H. Poincaré

Die Maxwellsche Theorie

und die Hertzschen Schwingungen

Die Telegraphie ohne Draht

3,20 1/1218 Phys. u. Chem.
1031 i.
1140 d

UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK LEIPZIG
0024411586

Die Maxwellsche Theorie
und die Hertzschen Schwingungen

Die Telegraphie ohne Draht

Von

H. Poincaré

Aus dem Französischen übersetzt von Max Iklé

bg, 230

BIBL.
VNIVERS.
LIPS.

LEIPZIG
Verlag von Johann Ambrosius Barth
1909

Spamersche Buchdruckerei in Leipzig.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

Geleitwort des Übersetzers 7

Erstes Kapitel.
Allgemeines über die elektrischen Erscheinungen.

1. Mechanische Erklärungsversuche 9
2. Elektrostatische Vorgänge 12
3. Widerstand der Leiter 15
4. Induktion 16
5. Elektrodynamische Anziehung 20

Zweites Kapitel.
Die Maxwellsche Theorie.

1. Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität 25
2. Verschiebungsströme 27
3. Natur des Lichtes 33

Drittes Kapitel.
Die elektrischen Schwingungen vor Hertz.

1. Die Versuche von Feddersen 35
2. Theorie von Lord Kelvin 38
3. Verschiedene Gleichnisse 40
4. Dämpfung 42

Viertes Kapitel.
Der Hertzsche Erreger.

1. Die Hertzsche Entdeckung 45
2. Das Prinzip des Erregers 46
3. Verschiedene Formen des Erregers 49
4. Die Rolle des Funkens 51
5. Einfluß des Lichtes 52
6. Verwendung von Öl 53
7. Wert der Wellenlänge 53

Fünftes Kapitel.

Hilfsmittel der Beobachtung.

Seite
1. Prinzip des Resonators 54
2. Wirkungsweise des Resonators 56
3. Verschiedene Verwendungsweisen des Funkens . . 59
4. Thermische Verfahren 60
5. Mechanische Verfahren 62
6. Vergleichung der verschiedenen Verfahren 63

Sechstes Kapitel.

Der Kohärer.

1. Radiokonduktoren 64
2. Theorie des Kohärers 67
3. Erklärung der Erscheinungen 70
4. Wirkungsweise des Kohärers 71
5. Magnetische Detektoren 74

Siebentes Kapitel.

Fortpflanzung längs eines Drahtes.

1. Erzeugung der Störungen in einem Drahte 77
2. Art der Fortpflanzung 79
3. Fortpflanzungsgeschwindigkeit und Diffusion 81
4. Die Versuche von Fizeau und Gounelle 83
5. Diffusion des Stromes 86
6. Die Versuche von Blondlot 87

Achtes Kapitel.

Messung der Wellenlänge und multiple Resonanz.

1. Stehende Wellen 92
2. Multiple Resonanz 95
3. Andere Erklärung 97
4. Die Versuche von Garbasso und von Zehnder . 101
5. Messung der Dämpfung 102
6. Die Versuche von Strindberg 103
7. Die Versuche von Pérot und von Jones 104
8. Die Versuche von Décombe 105

Neuntes Kapitel.

Fortpflanzung in Luft.

1. Das experimentum crucis 108
2. Die Karlsruher Versuche 112

Seite
3. Die Genfer Versuche 113
4. Verwendung des kleinen Erregers 114
5. Natur der Strahlungen 115

Zehntes Kapitel.
Fortpflanzung in Dielektriken.

1. Die Maxwellsche Beziehung 118
2. Dynamische Methoden 119
3. Statische Methoden 121
4. Ergebnisse 122
5. Leiter 124
6. Elektrolyten 126

Elftes Kapitel.
Erzeugung sehr schneller und sehr langsamer Schwingungen.

1. Sehr kurze Wellen 127
2. Der Righische Erreger 128
3. Resonatoren 130
4. Der Bosesche Erreger 132
5. Der Bosesche Empfänger 134
6. Tesla-Apparate 136

Zwölftes Kapitel.
Nachahmung der optischen Erscheinungen.

1. Bedingungen für die Nachahmung 138
2. Interferenzen 140
3. Dünne Blättchen 142
4. Sekundäre Wellen 143
5. Beugung 145
6. Polarisation 146
7. Polarisation durch Reflexion 147
8. Brechung 148
9. Totalreflexion 149
10. Doppelbrechung 150

Dreizehntes Kapitel.
Synthese des Lichtes.

1. Synthese des Lichtes 151
2. Sonstige Unterschiede 153

Seite
3. Erklärung der Sekundärwellen 156
4. Verschiedene Bemerkungen 160
5. Der singende Lichtbogen 162

Vierzehntes Kapitel.

Das Prinzip der drahtlosen Telegraphie.

1. Das Prinzip der drahtlosen Telegraphie 164
2. Unmöglichkeit, die Strahlung zu konzentrieren . . . 166
3. Übermittelte Energiemenge 168
4. Kurze Beschreibung der Apparate 170
5. Theoretische Erklärungen 172
6. Messung der Wellenlänge 174
7. Die Rolle der Antenne 177
8. Bedeutung der Dämpfung 180

Fünfzehntes Kapitel.

Anwendungen der drahtlosen Telegraphie.

1. Vorteile und Nachteile der drahtlosen Telegraphie . 181
2. Prinzip der abgestimmten Telegraphie 185
3. Marconis Sender 187
4. Marconis Empfänger 191
5. Drahtlose Telegraphie über den Ozean 195
6. Gerichtete Telegraphie 198

Geleitwort des Übersetzers.

An deutschen Werken über die drahtlose Telegraphie und an deutschen Übersetzungen fremdsprachlicher Werke über dasselbe Thema herrscht durchaus kein Mangel. Viele dieser Bücher gehören auch zu den besten Erzeugnissen der neueren wissenschaftlichen Literatur. Ist es unter diesen Verhältnissen nicht mindestens überflüssig, die Zahl solcher Bücher durch die Übersetzung einer französischen Monographie, die noch dazu nicht aus allerneuester Zeit stammt, noch zu vermehren? Diese Frage habe ich mir vorgelegt, als seitens der Verlagsanstalt die Aufforderung an mich gerichtet wurde, die dritte Auflage der Schrift von *H. Poincaré: „La Théorie de Maxwell et les Oszillations Hertziennes. La Télégraphie sans Fil“* ins Deutsche zu übertragen.

Die eingehende Lektüre des französischen Textes hat meine Bedenken vollständig zerstreut. Das Poincarésche Buch ist so durchaus eigenartig, daß es neben den bereits vorhandenen sehr wohl wird bestehen können, ohne deren Kreise zu stören. Ja, ich darf getrost behaupten, daß es für die meisten Leser eine willkommene Ergänzung zu diesen Büchern bilden wird. Poincaré beschränkt sich dar-

auf, in großen Zügen die Grundlagen der drahtlosen Telegraphie darzulegen, ohne auf die Vorzüge und Nachteile der verschiedenen Systeme, auf ihre Unterschiede, auf Prioritätsfragen und auf die mit den einzelnen Systemen erreichten Erfolge einzugehen. Deshalb schließt das Buch auch im wesentlichen mit den Versuchen zwischen Poldhu und dem Carlo Alberto ab, und nur kurz wird noch der Einführung des Poulsenschen Systems Erwähnung getan. Die späterhin erzielten Erfolge sind für das Verständnis der Grundlagen gleichgültig.

Ein besonderer Vorzug des Buches besteht darin, daß der Verfasser es verstanden hat, in knapper und dabei niemals trockener Darstellung, ohne Zuhilfenahme der Mathematik, an einer Reihe einfacher Gleichnisse, die einschlägigen Verhältnisse zu erklären. Die Darstellung ist populär im besten Sinne dieses nur allzu oft mißbräuchlich angewandten Wortes.

Ich hoffe, daß die Darstellung durch die Übertragung ins Deutsche nicht gar zu viel von ihrem Reize verloren haben möge.

Zehlendorf (Wannseebahn) bei Berlin,
im August 1908.

M. I.

Erstes Kapitel.

Allgemeines über die elektrischen Erscheinungen.

1. Mechanische Erklärungsversuche.

Eine vollständige mechanische Erklärung der elektrischen Erscheinungen zu geben und die Gesetze der Physik auf die Grundprinzipien der Dynamik zurückzuführen, das ist eine Aufgabe, die viele Forscher gelockt hat. Indessen, ist es nicht eine einigermaßen müßige Frage, welche unsere Kräfte rein nutzlos verbraucht?

Wenn diese Frage nur eine einzige Lösung zuließe, so würde der Besitz dieser einzigen Lösung, die ja die Wahrheit sein würde, nicht zu teuer bezahlt werden können. Aber das ist keineswegs der Fall: Wir würden es zweifellos dahin bringen können, einen Mechanismus zu erfinden, der eine mehr oder minder vollkommene Nachahmung der elektrostatischen und elektrodynamischen Erscheinungen geben würde. Aber wenn wir einen solchen Mechanismus ersinnen können, so können wir auch unzählig viele andere ersinnen.

Übrigens scheint bisher keiner von diesen sich durch seine Einfachheit auszuzeichnen und deshalb den Vorzug zu verdienen. Es ist daher nicht recht einzusehen, daß einer von ihnen uns besser als die übrigen das Geheimnis der Natur zu durchdringen gestatten sollte. Daraus ergibt sich, daß alle Mechanismen, die man vorschlagen kann, einen gewissen gekünstelten Charakter haben, der unserer Vernunft widerstrebt.

Einen der vollständigsten Mechanismen hat Maxwell zu einer Zeit entwickelt, da seine Vorstellungen noch nicht ihre endgültige Form angenommen hatten. Die verwickelte Struktur, die er dem Äther zuschrieb, machte sein System phantastisch und abstoßend. Man könnte glauben, die Beschreibung einer Fabrikanlage zu lesen, mit Zahnrädern und Kurbelstangen, die die Bewegung übertragen und sich unter der Anspannung biegen, mit Kugelregulatoren und Treibriemen.

Ungeachtet der Neigung der Engländer für derartige Vorstellungen, deren konkrete Anschaulichkeit sie gern haben, war Maxwell selbst der erste, der diese abgeschmackte Theorie verließ, und in seinen gesammelten Werken finden wir sie nicht. Wir können indessen nicht bedauern, daß sein Gedankengang diesen Umweg verfolgt hat, denn er ist dadurch zu den größten Entdeckungen geführt worden.

Es scheint nicht, daß sich auf demselben Wege viel Besseres leisten ließe. Ist es aber ein müßiger Versuch, sich den Mechanismus der elektrischen Erscheinungen in allen seinen Einzelheiten vorstellen zu wollen, so ist andererseits der Nachweis von großer Bedeutung, daß diese Erscheinungen den allgemeinen Gesetzen der Mechanik gehorchen.

Diese Gesetze sind nämlich unabhängig von dem besonderen Mechanismus, auf den sie Anwendung finden. Wir müssen sie unter allen verschiedenen Gestalten unveränderlich wiederfinden. Wenn die elektrischen Erscheinungen ihnen nicht gehorchen würden, so müßten wir auf jede Hoffnung einer mechanischen Erklärung verzichten. Wenn sie ihnen gehorchen, so steht die Möglichkeit einer solchen Erklärung fest, und das einzige Hemmnis besteht in der Schwierigkeit, unter allen Lösungen, welche das Problem zuläßt, die Auswahl zu treffen.

Wie aber können wir uns, ohne den ganzen Apparat der mathematischen Analysis zu entfalten, von der Übereinstimmung zwischen den Gesetzen der Elektrostatik und Elektrodynamik einerseits und den Prinzipien der Dynamik andererseits überzeugen?

Nun, durch eine Reihe von Vergleichen. Wenn wir eine elektrische Erscheinung analysieren wollen, so nehmen wir ein oder zwei wohlbekannte mechanische Vorgänge und versuchen, ihren vollständig parallelen Verlauf darzutun. Ein solcher Parallelis-

mus wird uns also eine hinreichende Gewähr für die Möglichkeit einer mechanischen Erklärung bieten.

Die Anwendung der mathematischen Analysis würde nur dazu dienen, zu zeigen, daß diese Vergleiche nicht nur rohe Annäherungen sind, sondern daß sie sich bis in die kleinsten Einzelheiten hinein fortsetzen lassen. Der Rahmen dieses Buches erlaubt mir nicht, so weit zu gehen, und ich muß mich auf einen sozusagen qualitativen Vergleich beschränken.

2. Elektrostatische Vorgänge.

Um einen Kondensator zu laden, muß man stets Arbeit aufwenden, und zwar mechanische Arbeit, wenn man eine Elektrisiermaschine laufen läßt, oder wenn man sich einer Dynamo bedient, chemische Energie, wenn man mittels einer Batterie lädt.

Aber die hierbei aufgewandte Energie ist nicht verloren, sie ist in dem Kondensator aufgespeichert, und dieser kann sie bei der Entladung wieder hergeben. Sie wird in Form von Wärme wiedergegeben werden, wenn man die beiden Belegungen einfach durch einen Draht miteinander verbindet; dieser Draht wird dann durch den Entladungsstrom erwärmt. Sie könnte auch in Gestalt mechanischer Energie zurückgegeben werden, wenn dieser Entladungsstrom einen kleinen elektrischen Motor treiben würde.

Ebenso muß man Arbeit aufwenden, um Wasser in ein Reservoir hinaufzuheben; aber diese Arbeit kann zurückgegeben werden, wenn beispielsweise das Wasser aus dem Reservoir dazu dient, ein Wasserrad in Umlauf zu versetzen.

Wenn sich zwei geladene Leiter auf demselben Potential befinden und man sie durch einen Draht verbindet, so wird das Gleichgewicht nicht gestört werden. Wenn dagegen die anfänglichen Potentiale verschieden sind, so wird ein Strom von dem einen Leiter zum anderen durch den Draht fließen, bis die Gleichheit des Potentials wiederhergestellt sein wird.

Ebenso fließt das Wasser, wenn es in zwei Behältern auf verschiedenes Niveau gestiegen ist, und die Behälter durch ein Rohr verbunden werden, aus dem einen in den anderen, bis das Niveau in beiden Behältern das gleiche ist.

Der Parallelismus ist also vollkommen: Das *Potential* eines Kondensators entspricht dem Wasserniveau in einem Reservoir, die *Ladung* des Kondensators der in dem Reservoir enthaltenen Wassermenge.

Wenn beispielsweise der horizontale Querschnitt des Reservoirs 100 m^2 beträgt, so wird 1 m^3 Wasser erforderlich sein, um das Niveau um 1 cm steigen zu lassen. Wenn der Querschnitt doppelt so groß ist, wird doppelt so viel Wasser erforderlich

sein. Dieser horizontale Querschnitt entspricht somit dem, was man die *Kapazität* des Kondensators nennt.

Wie soll man nach dieser Anschauungsweise die zwischen den elektrisierten Körpern auftretende Anziehung und Abstoßung deuten?

Diese mechanischen Wirkungen suchen die Potentialdifferenzen zu vermindern. Wenn man sie überwindet und beispielsweise zwei einander anziehende Körper voneinander entfernt, so wendet man Arbeit auf, man speichert elektrische Energie auf und vergrößert die Potentialdifferenzen. Wenn man dagegen die Leiter unbehindert ihrer gegenseitigen Anziehung folgen läßt, so wird die dergestalt aufgespeicherte elektrische Energie teilweise in Gestalt von mechanischer Arbeit zurückgegeben, und die Potentiale suchen sich auszugleichen.

Diese mechanischen Wirkungen würden also dem Druck entsprechen, den das in den Behältern aufgestaute Wasser auf deren Wände ausübt. Wir wollen beispielsweise annehmen, unsere beiden Behälter seien durch ein horizontales zylindrisches Rohr von großem Querschnitt miteinander verbunden, und in diesem Rohre bewege sich ein Kolben. Treibt man dann den Kolben in dem Sinne vor, daß er das Wasser in dem Behälter aufstaut, in welchem das Niveau höher ist, so wendet man Arbeit auf; läßt man hingegen den Kolben den auf seine beider-

seitigen Endflächen wirkenden Drucken gehorchen so verschiebt er sich in dem Sinne, daß die Niveaus sich auszugleichen suchen, und die in den Reservoiren aufgespeicherte Energie wird teilweise zurückgegeben.

Dieser hydraulische Vergleich ist der bequemste und der vollständigste. Er ist aber nicht der einzige, welcher möglich ist; beispielsweise kann man die bei der Ladung eines Kondensators verausgabte Arbeit mit der Arbeit vergleichen, die man aufwendet, wenn man ein Gewicht hebt, oder wenn man eine Feder spannt. Die in diesen Fällen aufgewendete Energie wird wieder gewonnen, wenn man das Gewicht sinken oder die Feder sich entspannen läßt, gerade wie wenn man die beiden Belegungen des Kondensators ihrer gegenseitigen Anziehung gehorchen läßt.

Wir werden im folgenden diese drei Vergleiche anwenden.

3. Widerstand der Leiter.

Wir wollen unsere beiden Reservoire durch ein langes horizontales Rohr von engem Querschnitt miteinander verbinden. Das Wasser wird langsam durch dieses Rohr fließen, und die Strömung wird um so größer sein, je größer der Niveauunterschied, je weiter der Querschnitt des Rohres und je kürzer das Rohr sein wird. Mit anderen Worten: der von

der inneren Reibung herrührende Widerstand des Rohres wird mit dessen Länge wachsen und mit zunehmendem Rohrquerschnitt abnehmen.

Wir wollen nun ebenso zwei Leiter durch einen langen und dünnen Metalldraht miteinander verbinden. Die Stromstärke, das heißt der Elektrizitätsfluß, wächst mit der Differenz der beiden Potentiale und mit dem Querschnitt des Drahtes, sie steht hingegen im umgekehrten Verhältnis zur Drahtlänge.

Der elektrische Widerstand eines Drahtes ist also dem hydraulischen Widerstande unseres Rohres vergleichbar; er ist geradezu eine Reibung. Die Ähnlichkeit wird noch dadurch vervollständigt, daß dieser Widerstand den Draht erhitzt und gerade wie die Reibung Wärme erzeugt.

Die Ähnlichkeit tritt in dem bekannten Versuch von Foucault schlagend hervor: Läßt man eine Kupferscheibe sich in einem Magnetfelde drehen, so hat man einen beträchtlichen Widerstand zu überwinden, und die Scheibe wird heiß. Der ganze Vorgang verläuft so, als ob sich die Scheibe an irgend einem unsichtbaren Bremsklotz reibe.

4. Induktion.

Sind zwei Drähte einander benachbart, und wird der eine von ihnen von einem veränderlichen Strom durchflossen, so entstehen in dem andern Ströme, die unter dem Namen *Induktionsströme* bekannt sind.

Wenn die Primärstromstärke wächst, so verläuft der Sekundärstrom im entgegengesetzten Sinne wie der Primärstrom; er verläuft im gleichen Sinne wie der Primärstrom, wenn dessen Stärke abnimmt. Diese Erscheinung nennt man *gegenseitige Induktion.*

Aber hiermit nicht genug, erzeugt ein veränderlicher Strom in demselben Drahte, in dem er fließt, induzierte elektromotorische Kräfte. Eine solche elektromotorische Kraft wirkt dem Strom entgegen, wenn seine Stärke wächst, sie sucht den Strom zu verstärken, wenn seine Stärke abnimmt. Diese Erscheinung nennt man *Selbstinduktion.*

In unserem Bilde ist die Selbstinduktion leicht zu erklären. Es scheint, daß man einen gegenelektromotorischen Widerstand überwinden muß, um die Elektrizität in Bewegung zu setzen, daß aber diese Bewegung, wenn sie einmal begonnen hat, sich von selbst fortzusetzen sucht. *Die Selbstinduktion ist also eine Art Trägheit.*

Ebenso muß man einen Widerstand überwinden, um ein Fahrzeug anlaufen zu lassen; ist es aber einmal in Bewegung gebracht, so setzt es seine Bewegung von selbst fort.

Fassen wir alles zusammen, so kann ein Strom zu überwinden haben:

1. den Ohmschen Widerstand des Drahtes (dieser ist immer vorhanden und wirkt immer dem Strome entgegen);

2. die Selbstinduktion, falls die Stromstärke veränderlich ist;
3. elektromotorische Gegenkräfte elektrostatischen Ursprungs, wenn in der Nachbarschaft des Drahtes oder auf dem Drahte selbst elektrische Ladungen vorhanden sind.

Die beiden letztgenannten Widerstände können übrigens negativ werden und den Strom zu verstärken suchen.

Wir wollen nun hiermit die Widerstände vergleichen, die ein sich bewegendes Fahrzeug auf seinem Wege trifft:

1. der Ohmsche Widerstand ist, wie wir gesehen haben, der Reibung analog;
2. die Selbstinduktion entspricht der Trägheit des Fahrzeuges;
3. die Kräfte elektrostatischen Ursprungs endlich würden der Schwerkraft entsprechen, die auf ansteigender Straße zu überwinden ist und auf absteigender Straße eine Hilfe wird.

Bei der gegenseitigen Induktion liegen die Dinge ein wenig verwickelter. Denken wir uns eine Kugel S von beträchtlicher Masse; diese Kugel möge zwei einander diametral gegenüberstehende lange Arme tragen, und an den Enden dieser Arme sollen kleine Kugeln s_1 und s_2 angebracht sein; das Ganze soll sich wie ein einziger fester Körper verhalten.

S stellt den Äther dar, s_1 den Primärstrom, s_2 den Sekundärstrom.

Wenn wir nun versuchen, die kleine Kugel s_1 in Bewegung zu setzen, so können wir das ohne allzu große Mühe tun; die Kugel S wird sich aber nicht so leicht bewegen; im ersten Augenblick wird sie unbeweglich bleiben. Das ganze System wird sich um S drehen, und die Kugel s_2 wird eine Bewegung annehmen, welche der von s_1 entgegengerichtet ist.

Wir haben hier das Bild der gegenseitigen Induktion. Die Kugeln s_1 und s_2 entsprechen den beiden Leitern; die Kugel S, die man sich als unsichtbar vorstellen muß, vertritt den sie umgebenden Äther. Wenn die Bewegung von s_1 beschleunigt wird, so nimmt s_2 eine Bewegung in entgegengesetzter Richtung an; geradeso entsteht ein Sekundärstrom von entgegengesetztem Sinne, wenn der Primärstrom beschleunigt wird.

Verfolgen wir unser Gleichnis weiter. Ich nehme an, daß s_1 und s_2, um sich zu bewegen, eine gewisse Reibung zu überwinden haben (das ist der Ohmsche Widerstand der beiden Leiter); dagegen hat S keinen weiteren Widerstand zu überwinden als seine Trägheit. Wir wollen nun annehmen, die bewegende Kraft wirke fortgesetzt auf s_1: dann wird sich schließlich folgender Zustand einstellen: die Kugel s_1 wird sich gleichförmig bewegen und die Kugel S mit sich ziehen, die, wenn sie einmal in

Bewegung versetzt ist, keinen Widerstand mehr entgegenstellt. Dagegen wird s_2 infolge der Reibung zur Ruhe kommen, und das ganze System wird sich um s_2 drehen. Der Primärstrom ist konstant geworden, der Sekundärstrom hat aufgehört.

Schließlich soll die bewegende Kraft aufhören, auf s_1 zu wirken: infolge der Reibung wird die Bewegung von s_1 verlangsamt werden. Aber die Kugel S wird dank ihrer gewaltigen Trägheit ihre Bewegung fortsetzen und die Kugel s_2 mit sich ziehen, und diese nimmt nun eine Geschwindigkeit vom gleichen Sinne an wie die von s_1. Der Primärstrom wird schwächer, der induzierte Strom ist vom gleichen Sinne wie der primäre.

In diesem Bilde stellt S den Äther dar, der die beiden Drähte umgibt: die Trägheit dieses Äthers ist es, die die Erscheinungen der gegenseitigen Induktion hervorbringt. Dasselbe gilt von der Selbstinduktion: die Trägheit, welche man überwinden muß, um einen Strom in einem Drahte zu erzeugen, ist nicht die Trägheit des Äthers, welcher diesen Draht durchdringt, es ist vielmehr die Trägheit des Äthers, der ihn umgibt.

5. Elektrodynamische Anziehung.

Ich habe oben durch einen Vergleich die Erklärung der elektrostatischen Anziehung und der Induktionserscheinungen darzulegen versucht. Wir

wollen jetzt sehen, welche Vorstellung sich Maxwell von der Ursache macht, aus der die gegenseitige Anziehung der Ströme hervorgeht.

Während die elektrostatische Anziehung auf der Spannung einer Menge kleiner Federn, oder mit anderen Worten auf der Elastizität des Äthers beruhen soll, wären es die lebendige Kraft und die Trägheit dieses Fluidums, die die Induktionserscheinungen und die elektrodynamischen Wirkungen hervorbringen.

Die vollständige Rechnung ist viel zu lang, um hier Platz zu finden, und ich muß mich wieder mit einem Gleichnis begnügen. Ich will es einem bekannten Apparat, dem Zentrifugalregulator, entlehnen.

Die lebendige Kraft dieses Apparates ist proportional dem Quadrat der Winkelgeschwindigkeit seiner Umdrehung und proportional dem Quadrat des Abstandes der Kugeln.

Nach der Maxwellschen Hypothese ist der Äther in Bewegung, sobald Voltaströme vorhanden sind, und seine lebendige Kraft ist proportional dem Quadrat aus der Stärke dieser Ströme; die Stromstärke entspricht also in der Parallele, die ich hier zu ziehen versuche, der Winkelgeschwindigkeit bei der Umdrehung.

Wenn wir zwei gleichgerichtete Ströme betrachten, so ist diese lebendige Kraft bei gleicher Stromstärke um so größer, je näher beieinander

die Ströme sind; sind die Ströme entgegengesetzt gerichtet, so ist sie um so größer, je weiter die Ströme voneinander entfernt sind.

Dies vorausgeschickt, wollen wir unser Gleichnis weiter verfolgen.

Um die Winkelgeschwindigkeit des Regulators, und folglich seine lebendige Kraft, zu vergrößern, muß man ihm Arbeit zuführen und demnach einen Widerstand überwinden, den man seine *Trägheit* nennt.

Will man andererseits die Stärke der Ströme erhöhen, so heißt das, die lebendige Kraft des Äthers erhöhen, und um dies zu erreichen, muß man Arbeit leisten und einen Widerstand überwinden; dieser Widerstand ist aber nichts anderes als die Trägheit des Äthers, und man nennt ihn die *Induktion.*

Die lebendige Kraft wird größer sein, wenn die Ströme gleichgerichtet und nahe beieinander sind; die zu leistende Arbeit und die elektromotorische Gegenkraft der Induktion werden also größer sein. Das drückt man in gewöhnlicher Sprache dadurch aus, daß man sagt, die gegenseitige Induktion der beiden Ströme geselle sich ihrer Selbstinduktion zu. Das Gegenteil ist der Fall, wenn die beiden Ströme entgegengesetzt gerichtet sind.

Wenn man die Kugeln des Regulators voneinander entfernt, so muß man, um die Winkelgeschwindigkeit aufrecht zu erhalten, Arbeit leisten, denn bei gleicher Winkelgeschwindigkeit ist die

lebendige Kraft um so größer, je weiter die Kugeln voneinander entfernt sind.

Wenn andererseits die beiden Ströme gleichgerichtet sind und einander genähert werden, so muß man Arbeit leisten, um die Stromstärke aufrecht zu erhalten, weil die lebendige Kraft größer wird. Man hat also eine elektromotorische Gegenkraft der Induktion zu überwinden, welche die Stromstärke zu vermindern strebt. Sie würde dagegen die Stromstärke zu erhöhen streben, wenn die Ströme gleichgerichtet wären und man sie voneinander entfernte, oder wenn sie entgegengesetzt gerichtet wären und man sie einander näherte.

Die mechanischen Wirkungen der Ströme aufeinander erklären sich in derselben Weise.

Die Fliehkraft sucht die Kugeln voneinander zu entfernen. *Das würde eine Erhöhung der lebendigen Kraft zur Folge haben, wenn man die Winkelgeschwindigkeit konstant halten würde.*

Ebenso *ziehen sich die Ströme an,* wenn sie gleichgerichtet sind, das heißt, sie suchen sich gegenseitig zu nähern. *Das würde eine Erhöhung der lebendigen Kraft zur Folge haben, wenn man die Stromstärke konstant halten würde.* Wenn die Ströme entgegengesetzt gerichtet sind, so stoßen sie sich ab und suchen sich voneinander zu entfernen. Das würde bei konstanter Stromstärke gleichfalls eine Erhöhung der lebendigen Kraft zur Folge haben.

Fassen wir das Gesagte zusammen, so entspricht in unserm Gleichnis, wenn wir die beiden Ströme entgegengesetzt gerichtet annehmen, die Umdrehungsgeschwindigkeit der Stromstärke und die Entfernung der Kugeln der Entfernung der Ströme. Die Kugeln streben sich voneinander zu entfernen und scheinen sich abzustoßen; ebenso stoßen sich die beiden Ströme ab.

Die elektrostatischen Erscheinungen würden somit auf die Elastizität des Äthers und die elektrodynamischen Erscheinungen auf seine lebendige Kraft zurückzuführen sein. Würde sich nun diese Elastizität ihrerseits, wie Lord Kelvin meint, aus der Rotation kleinster Teilchen des Fluidums erklären? Verschiedene Gründe können diese Hypothese verlockend erscheinen lassen; sie spielt aber in der Maxwellschen Theorie, die von ihr unabhängig ist, keine wesentliche Rolle.

Ich habe im vorstehenden Vergleiche mit verschiedenen Mechanismen gezogen. Es sind aber nur Gleichnisse, und sogar ziemlich grobe. Man darf nämlich in dem Werke Maxwells keine vollständige mechanische Erklärung der elektrischen Erscheinungen suchen, sondern nur die Darlegung der Bedingungen, denen jede Erklärung genügen muß.

Der bleibende Wert des Maxwellschen Werkes besteht eben darin, daß er von jeder speziellen Erklärung unabhängig ist.

Zweites Kapitel.

Die Maxwellsche Theorie.

1. Beziehungen zwischen Licht und Elektrizität.

In dem Augenblick, da die Versuche von Fresnel alle Gelehrten zwangen, anzunehmen, daß das Licht auf Schwingungen eines sehr feinen Fluidums beruht, welches den Raum zwischen den Planeten erfüllt, wurden durch die Arbeiten Ampères die Gesetze der Wechselwirkungen zwischen den Strömen bekannt und damit die Elektrodynamik begründet.

Man brauchte nur noch einen Schritt zu tun, um zu der Annahme zu gelangen, daß eben dieses Fluidum, der Äther, das die Ursache der Lichterscheinungen ist, auch gleichzeitig der Träger der elektrischen Wirkungen ist. Diesen Schritt tat Ampères Phantasie. Aber zweifellos hat dieser große Physiker, als er diese verlockende Hypothese aussprach, nicht vorausgesehen, daß sie so bald eine präzisere Form annehmen und bereits eine teilweise Bestätigung erfahren sollte.

Sie war indessen nur ein wesenloser Traum bis zu dem Tage, wo die elektrischen Messungen eine unerwartete Tatsache zutage förderten.

Das Verhältnis zwischen der „absoluten elektrostatischen Einheit“ und der „absoluten elektrodynamischen Einheit“ wird durch eine Geschwindigkeit

gemessen. Maxwell hat mehrere Methoden ersonnen, um den Wert dieser Geschwindigkeit zu erhalten. Die Ergebnisse, zu denen er gelangte, schwankten um den Wert 300000 km in der Sekunde, das heißt gerade um die Lichtgeschwindigkeit.

Die Beobachtungen wurden bald so genau, daß man nicht mehr daran denken konnte, diese Übereinstimmung einem Zufall zuzuschreiben. Man konnte also nicht daran zweifeln, daß gewisse innere Beziehungen zwischen den optischen Erscheinungen und den elektrischen Vorgängen beständen. Aber die Natur dieser Beziehungen würde sich vielleicht heute noch unserer Kenntnis entziehen, wenn das Genie Maxwells sie nicht geahnt hätte.

Diese unerwartete Übereinstimmung ließ sich folgendermaßen deuten: Längs eines Drahtes aus vollkommen leitendem Material pflanzt sich eine elektrische Störung mit der Geschwindigkeit des Lichtes fort. Zu diesem Ergebnis führten die auf die alte Elektrodynamik gegründeten Rechnungen Kirchhoffs.

Aber das Licht pflanzt sich nicht längs eines metallischen Drahtes fort, sondern durch die durchsichtigen Körper, durch die Luft, durch den leeren Raum. Eine Fortpflanzung dieser Art war in der alten Elektrodynamik keineswegs vorgesehen.

Um aus den damals bevorzugten elektrodynamischen Theorien die Optik ableiten zu können,

mußte man diese Theorien von Grund auf umbilden, ohne daß sie darum aufhörten, alle bekannten Tatsachen zu erklären. Das war das Werk Maxwells.

2. Verschiebungsströme.

Wie jeder weiß, kann man die Körper in zwei Klassen teilen, in Leiter, in denen wir Verschiebungen der Elektrizität, das heißt Voltaströme, beobachten, und in Isolatoren oder dielektrische Körper. Nach Ansicht der alten Elektriker waren die Dielektrika einfach passive Körper, und ihre Rolle beschränkte sich darauf, daß sie sich dem Durchgange der Elektrizität widersetzten. War das der Fall, so würde man irgendeinen Isolator durch einen anderen Isolator ersetzen können, ohne an den Erscheinungen irgend etwas zu ändern. Die Versuche Faradays haben gezeigt, daß dies nicht der Fall ist: zwei Kondensatoren von derselben Gestalt und denselben Abmessungen, die mit denselben Elektrizitätsquellen verbunden sind, nehmen nicht dieselbe Ladung an, wenngleich die Dicke der isolierenden Schicht dieselbe ist, falls die *Natur* des isolierenden Materials verschieden ist. Maxwell hatte die Arbeiten Faradays zu gründlich studiert, um nicht die Bedeutung der Dielektrika und die Notwendigkeit zu erfassen, ihnen ihre wahre Rolle zuzuteilen.

Wenn es übrigens richtig ist, daß das Licht nur eine elektrische Erscheinung ist, so muß doch, wenn

das Licht sich durch einen Isolator fortpflanzt, dieser der Sitz dieser Erscheinung sein; es müssen also elektrische Erscheinungen vorhanden sein, die in den Dielektriken lokalisiert sind. Aber von welcher Natur können sie sein? Darauf antwortet Maxwell kühn: Es sind Ströme.

Alle Erfahrung, die man zu jener Zeit besaß, schien dem zu widersprechen: Man hatte niemals anderswo als in den Leitern Ströme beobachtet. Wie konnte Maxwell seine kühne Hypothese mit einer so feststehenden Tatsache in Einklang bringen? Warum bringen diese hypothetischen Ströme unter gewissen Umständen offenkundige Wirkungen hervor, während sie unter gewöhnlichen Verhältnissen nicht zu beobachten sind?

Der Sachverhalt ist der, daß die Dielektrika dem Durchgang der Elektrizität nicht einen größeren Widerstand entgegensetzen als die Leiter, sondern einen Widerstand von anderer Art. Ein Vergleich wird den Gedankengang Maxwells verständlicher machen.

Wenn man sich bemüht, eine Feder zu spannen, so begegnet man einem Widerstand, der in dem Maße zunimmt, wie die Feder angespannt wird. Wenn man daher nur über eine begrenzte Kraft verfügt, so wird ein Augenblick eintreten, wo dieser Widerstand nicht mehr überwunden werden kann; die Bewegung wird aufhören, und es wird Gleich-

gewicht eintreten. Wenn schließlich die Kraft aufhört zu wirken, wird sich die Feder entspannen und dabei die gesamte Arbeit zurückgeben, die man aufgewendet hat, um sie zu spannen.

Nehmen wir dagegen an, wir wollten einen in Wasser tauchenden Körper verschieben: in diesem Falle werden wir einen Widerstand finden, der von der Geschwindigkeit abhängt, der dabei aber nicht in dem Maße wachsen wird, wie sich der Körper weiter bewegt, sofern die Geschwindigkeit konstant bleibt. Die Bewegung wird also so lange weiter gehen können, wie die bewegende Kraft wirkt, und wir werden niemals Gleichgewicht erreichen. Wenn schließlich die Kraft verschwindet, so wird der Körper nicht zurückzukehren streben, und die Arbeit, die wir aufgewendet haben, um den Körper vorwärts zu bringen, kann uns nicht zurückerstattet werden; sie wird ganz und gar durch die Viskosität des Wassers in Wärme umgewandelt worden sein.

Der Gegensatz liegt klar zutage: man muß den *elastischen* Widerstand von dem *viskosen* unterscheiden. Die Dielektrika würden sich danach gegenüber der Bewegung der Elektrizität verhalten wie elastische feste Körper gegenüber materieller Bewegung; dagegen würden sich die Leiter wie viskose Flüssigkeiten verhalten. Wir haben demzufolge zwei Gattungen von Strömen: die *Verschiebungsströme* oder Maxwellströme, welche die Dielektrika

durchdringen, und die gewöhnlichen *Leitungsströme*, welche in den Leitern fließen.

Die ersteren haben eine Art *elastischen* Widerstandes zu überwinden und können daher nur von kurzer Dauer sein; da nämlich dieser Widerstand unaufhörlich wächst, so wird alsbald das Gleichgewicht hergestellt sein.

Die Leitungsströme hingegen müssen eine Art *viskosen* Widerstandes überwinden und können infolgedessen so lange andauern wie die elektromotorische Kraft, welche sie hervorbringt.

Kehren wir zu unserem aus der Hydraulik entlehnten Gleichnis zurück. Wir wollen annehmen, wir hätten in einem Behälter Wasser unter Druck. Wir setzen diesen Behälter mit einem aufrecht stehenden Rohr in Verbindung, und das Wasser wird in diesem Rohre aufsteigen. Die Bewegung wird aber aufhören, sobald das hydrostatische Gleichgewicht erreicht sein wird. Wenn das Rohr weit ist, wird weder Reibung noch Ladungsverlust auftreten, und das auf solche Weise gehobene Wasser wird zur Leistung von Arbeit Verwendung finden können. Wir haben hier das Bild des Verschiebungsstromes.

Wenn hingegen das Wasser durch ein horizontales Rohr ausfließt, so wird die Bewegung so lange andauern, wie der Behälter noch nicht leer ist; wenn aber das Rohr eng ist, wird ein beträchtlicher Arbeitsverlust und eine Wärmeproduktion infolge der Reibung

stattfinden. Wir haben hier das Bild des Leitungsstromes.

Es ist zwar unmöglich, und es wäre auch einigermaßen müßig, wenn wir versuchen wollten, uns alle Einzelheiten des Mechanismus vorzustellen, aber wir können doch sagen, daß alles so verläuft, als wenn die Verschiebungsströme die Wirkung hätten, eine Menge kleiner Federn zu spannen. Wenn diese Ströme aufhören, ist das elektrostatische Gleichgewicht hergestellt, und diese Federn sind um so stärker gespannt, je stärker das elektrische Feld ist. Die in diesen Federn aufgespeicherte Arbeit, das heißt die elektrostatische Energie, kann vollständig zurückgegeben werden, sobald die Federn sich entspannen können. Auf diese Weise erhalten wir mechanische Arbeit, wenn wir die Leiter der *elektrostatischen Anziehung* gehorchen lassen. Diese Anziehung würde sonach von dem Druck herrühren, den die gespannten Federn auf die Leiter ausüben. Um schließlich das Bild bis zu Ende durchzuführen, müßten wir die disruptive Entladung mit dem Zerspringen einiger zu stark gespannter Federn vergleichen.

Im Gegensatz hierzu wird die Arbeit, die wir aufwenden, um Leitungsströme zu erzeugen, gänzlich verloren und in Wärme umgewandelt, gerade wie die Arbeit, die man aufwendet, um die Reibung oder die Viskosität der Flüssigkeiten zu überwinden. *Aus diesem Grunde werden die Leitungsdrähte warm.*

Nach der Anschauungsweise Maxwells *gibt es nur geschlossene Ströme.* Nach der Auffassung der alten Elektriker war das nicht der Fall. Sie betrachteten als geschlossen den Strom, der in einem die beiden Pole einer Batterie verbindenden Drahte fließt. Wenn man aber die beiden Pole, statt sie direkt miteinander zu verbinden, mit je einer der beiden Belegungen eines Kondensators in Verbindung setzte, so galt der momentane Strom, der andauert, bis der Kondensator geladen ist, als offen. Er geht, so dachte man, von einer Belegung durch den Verbindungsdraht und die Batterie zur anderen Belegung und macht an der Oberfläche dieser beiden Belegungen halt. Maxwell dagegen nimmt an, daß der Strom als Verschiebungsstrom durch die isolierende Schicht hindurchgeht, welche die beiden Belegungen trennt, und daß er sich auf diese Weise vollkommen schließt. Der elastische Widerstand, den er bei diesem Durchgange trifft, erklärt seine kurze Dauer.

Die Ströme können auf dreierlei Weise zur Geltung kommen: durch ihre Wärmewirkung, durch ihre Wirkung auf die Magnetnadel und auf Ströme, und durch die induzierten Ströme, welche sie hervorrufen. Wir haben oben gesehen, weshalb die Leitungsströme Wärme entwickeln und die Verschiebungsströme nicht. Dafür müssen nach Maxwells Hypothese die Ströme, die er sich vorstellt, wie gewöhnliche

Ströme elektromagnetische, elektrodynamische und induzierende Wirkung ausüben.

Warum hat man diese Wirkungen noch nicht sichtbar machen können? Deshalb, weil ein nicht sehr starker Verschiebungsstrom nicht lange *in demselben Sinne* andauern kann: die unaufhörlich wachsende Spannung unserer Federn würde ihn nämlich alsbald aufhalten. Es kann daher in den Dielektriken weder ein Gleichstrom von langer Dauer noch ein merklicher Wechselstrom von langer Periode bestehen. Die Wirkungen werden dagegen wahrnehmbar, wenn der Wechsel sehr schnell erfolgt.

3. Natur des Lichtes.

Hier liegt nach Maxwells Auffassung der Ursprung des Lichtes. Eine Lichtwelle ist eine Folge von Wechselströmen, die in den Dielektriken und selbst in der Luft oder in dem leeren Raum zwischen den Planeten entstehen, und die ihre Richtung etwa tausend Trillionen mal in der Sekunde wechseln. Die durch diesen häufigen Wechsel entstehende gewaltige Induktion ruft andere Ströme in den benachbarten Teilen der Dielektrika hervor, und auf diese Weise pflanzen sich die Lichtwellen Schritt für Schritt fort. Die Rechnung lehrt, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit gleich dem *Verhältnis der Einheiten*, das heißt gleich der Lichtgeschwindigkeit, ist.

Diese Wechselströme sind eine Art elektrischer Schwingungen; aber sind diese Schwingungen nun longitudinal wie die Schallschwingungen oder transversal wie die Fresnelschen Ätherschwingungen? Beim Schall erfährt die Luft abwechselnd Verdichtungen und Verdünnungen. Dagegen verhält sich der Äther Fresnels bei seinen Schwingungen so, als sei er aus nicht zusammendrückbaren Schichten gebildet, die nur aufeinander zu gleiten vermögen. Gäbe es *offene* Ströme, so würde die Elektrizität, die von einem Ende dieser Ströme zum andern geht, sich an einem der Enden anhäufen; sie würde sich verdichten oder verdünnen wie die Luft, und ihre Schwingungen wären longitudinal. Maxwell nimmt aber nur geschlossene Ströme an; eine derartige Anhäufung ist dabei unmöglich, und die Elektrizität verhält sich wie der inkompressible Äther Fresnels: ihre Schwingungen sind transversal.

Wir finden somit alle Ergebnisse der Wellentheorie wieder. Das genügte indessen nicht, um alle Physiker, die sich mehr bestochen als überzeugt fühlten, für die Annahme der Maxwellschen Anschauungen zu entscheiden. Alles, was man zu deren Gunsten sagen konnte, war, daß sie mit keiner der beobachteten Tatsachen in Widerspruch standen, und daß es sehr schade gewesen wäre, wenn sie nicht richtig wären. Aber die experimentelle Bestätigung fehlte: sie sollte 25 Jahre auf sich warten lassen.

Es mußte zwischen der alten Theorie und der Maxwellschen ein Entscheidungsmerkmal gefunden werden, das für unsere groben Forschungshilfsmittel nicht zu fein sein durfte. Es gab nur ein Merkmal, aus dem sich ein experimentum crucis herleiten ließ

Hier setzte die Arbeit von Hertz ein, von der wir jetzt sprechen wollen.

Drittes Kapitel.

Die elektrischen Schwingungen vor Hertz.

1. Die Versuche von Feddersen.

Man hat sehr frühzeitig durch mechanische Hilfsmittel Wechselströme erzeugt; beispielsweise unter Verwendung von rotierenden Kommutatoren, Neeffschen Hämmern usw. In gewissem Sinne waren das schon elektrische Schwingungen, aber naturgemäß solche von nur geringer Frequenz.

Die Entladung eines Kondensators sollte ein Mittel liefern, viel schnellere Schwingungen zu erreichen. Feddersen war der erste, der experimentell nachwies, daß die Entladung der Leidener Flasche unter gewissen Bedingungen eine oszillierende sein kann.

Feddersen beobachtete den durch die Entladung einer Leidener Flasche hervorgebrachten

Funken in einem rotierenden Hohlspiegel; er hat ferner das Bild des Funkens mit Hilfe eines solchen Spiegels auf eine lichtempfindliche Platte geworfen und auf diese Weise den Funken in seinen verschiedenen Gestalten photographiert.

Er veränderte den Widerstand des Kreises: bei schwachem Widerstand erhielt er eine schwingende Entladung, und seine Anordnung gestattete ihm, zu sehen, wie sich die Periode änderte, wenn er die Kapazität des Kondensators oder die Selbstinduktion des Schwingungskreises veränderte.

Um die Kapazität zu verändern, brauchte er nur die Anzahl der Leidener Flaschen zu verändern; Feddersen hat die Proportionalität zwischen der Periode und der Quadratwurzel aus der Kapazität nahezu bestätigt gefunden.

Um die Selbstinduktion zu verändern, änderte Feddersen die Länge des Leitungsdrahtes. Die Periode war der Wurzel aus der Selbstinduktion nahezu proportional; nur nahezu, denn die Länge des Drahtes erreichte bei den Versuchen von Feddersen zuweilen mehrere hundert Meter; er war an der Wand aufgehängt und bildete mit dieser einen richtigen Kondensator, dessen Kapazität gegenüber der des eigentlichen Kondensators nicht zu vernachlässigen war.

Was nun den Proportionalitätsfaktor angeht, so war Feddersen nicht imstande, ihn festzustellen,

weil er den Wert für die Kapazität seiner Kondensatoren nicht genau kannte; er hat nur die Proportionalität selbst feststellen können.

Feddersen hat Perioden von der Größenordnung 10^{-4} Sekunden erhalten.

Durch allmähliche Erhöhung des Wertes für den Widerstand, die er durch Einschaltung von kleinen mit Schwefelsäure gefüllten Röhren in den Entladungskreis bewerkstelligte, erhielt er kontinuierliche und schließlich intermittierende Entladungen, letztere bei sehr hohen Werten des Widerstandes, beispielsweise bei Verwendung feuchter Schnüre.

Eine kontinuierliche Entladung muß offenbar in einem rotierenden Spiegel das Bild einer kontinuierlichen Lichtlinie geben; eine alternierende oder intermittierende Entladung muß eine Reihe voneinander getrennter Lichtflecken liefern.

Die Photographien der oszillierenden Entladungen, die Feddersen erhalten hat, zeigen ein ganz eigentümliches Aussehen. Wir erblicken auf ihnen eine Reihe heller und dunkler Punkte; diese entsprechen den beiden Enden des Funkens; aber die dem einen Ende zugehörigen hellen Punkte entsprechen den dem anderen Ende zugehörigen dunklen, und umgekehrt.

Das ist leicht erklärlich: Wenn nämlich ein Funke in Luft überspringt, so werden die von der positiven Elektrode losgerissenen Teilchen glühend. Für die

negativen Teilchen gilt nicht dasselbe. Das positive Ende des Funkens ist also heller als das negative.

Die Feddersenschen Photographien erbringen also den Beweis dafür, daß jedes Ende des Funkens abwechselnd positiv und negativ ist. Die Entladung ist demnach nicht intermittierend und immer gleichgerichtet, sondern sie ist oszillierend.

2. Theorie von Lord Kelvin.

Die Feddersenschen Versuche lassen eine sehr einfache Erklärung zu.

Denken wir uns zwei durch einen Draht miteinander verbundene Leiter (Konduktoren). (Bei dem Feddersenschen Versuch werden dies die beiden Belegungen des Kondensators sein.) Wenn diese beiden Leiter nicht auf demselben Potential stehen, so ist das elektrische Gleichgewicht gestört, geradeso wie das mechanische Gleichgewicht gestört ist, wenn ein Pendel aus der vertikalen Lage entfernt wird. In dem einen wie in dem anderen Falle sucht das Gleichgewicht sich wiederherzustellen.

Es fließt ein Strom in dem Drahte und sucht das Potential der beiden Leiter auszugleichen, wie sich das Pendel der Vertikallage nähert. Aber das Pendel wird in seiner Gleichgewichtslage nicht haltmachen; es hat eine gewisse Geschwindigkeit erlangt und wird nunmehr, dank seiner Trägheit, über diese Lage hinausgehen. Ebenso wird, wenn

unsere Leiter entladen sein werden, das elektrische Gleichgewicht, das für einen Augenblick hergestellt ist, nicht erhalten bleiben, sondern alsbald durch eine der Trägheit analoge Ursache gestört werden. Diese Ursache nun ist die *Selbstinduktion*, deren Analogie mit der Trägheit wir weiter oben kennen gelernt haben.

Infolge der Selbstinduktion bleibt ein Strom nach dem Verschwinden der Ursache, der er seine Entstehung verdankt, bestehen, gerade wie ein Schwungrad nicht stehen bleibt, wenn die Kraft, die es in Bewegung gesetzt hatte, aufhört zu wirken.

Wenn die beiden Potentiale gleich geworden sind, wird also der Strom in derselben Richtung weiter fließen und zur Folge haben, daß die beiden Leiter Ladungen von entgegengesetztem Vorzeichen wie zuvor annehmen.

Es wird also in diesem Falle, gerade wie beim Pendel, die dem Gleichgewicht entsprechende Lage überschritten werden; um das Gleichgewicht herzustellen, muß man wieder zurückgehen.

Wenn das Gleichgewicht von neuem erreicht worden ist, so wird es alsbald aus demselben Grunde wieder gestört, und die Schwingungen setzen sich ohne Ende fort.

Die Rechnung ergibt, daß die Schwingungsperiode der Quadratwurzel aus der Kapazität der Leiter proportional ist; man braucht also nur diese Kapazität

hinreichend herabzumindern, was sich leicht bewerkstelligen läßt, und man erhält ein *elektrisches Pendel*, welches außerordentlich schnell wechselnde Ströme zu erzeugen vermag.

3. Verschiedene Gleichnisse.

Ich habe zur Erläuterung der Theorie von Lord Kelvin das Gleichnis eines Pendels angewendet. Man kann viele andere Gleichnisse benutzen.

Nehmen wir an Stelle eines Pendels eine Stimmgabel; wenn eine solche aus ihrer Gleichgewichtslage entfernt wird, so strebt ihre Elastizität, sie wieder in diese zurückzuführen. Aber von ihrer Trägheit getrieben geht sie darüber hinaus; ihre Elastizität führt sie wieder zurück, und so geht es weiter. Sie führt also eine Reihe von Schwingungen aus.

Ihre Elastizität spielt, wie man sieht, dieselbe Rolle wie die Schwere in der Theorie des Pendels und wie die elektrostatische Kraft bei der oszillierenden Entladung der Leidener Flasche, und die Trägheit der Feder spielt dieselbe Rolle wie die Trägheit des Pendels oder wie die Selbstinduktion.

Indessen ist es vielleicht noch besser, auf das hydraulische Gleichnis zurückzugreifen. Denken wir uns zwei Gefäße, die durch ein horizontales Rohr miteinander verbunden sind. Soll das Wasser im Gleichgewicht sein, so muß das Niveau in beiden Gefäßen dasselbe sein.

Wenn aus irgendwelcher Ursache diese Gleichheit des Niveaus gestört wird, so wird sie sich wiederherzustellen streben; das Niveau wird in dem Gefäß *A*, in dem es zuerst höher war, sinken und wird in dem Gefäß *B*, wo es zuerst tiefer war, steigen. Das in dem Rohre befindliche Wasser wird sich in der Richtung von dem Gefäß *A* zum Gefäß *B* in Bewegung setzen. Wenn aber die Niveaugleichheit wiederhergestellt ist, so wird die Bewegung infolge der Trägheit des in dem Rohre enthaltenen Wassers nicht aufhören; das Niveau wird in dem Gefäß *B* höher werden als in dem Gefäß *A*. Derselbe Vorgang wird sich nunmehr in umgekehrtem Sinne wiederholen, und so geht es fort.

Wir haben also eine Reihe von Schwingungen. Welche Periode werden sie haben? Die Periode wird um so länger sein, je größer der Querschnitt der als zylindrisch vorausgesetzten Gefäße ist. Wenn nämlich ein Liter Wasser aus dem einen Gefäß in das andere übergeht, so wird der durch diesen Übergang hervorgerufene Niveauunterschied um so geringer sein, je größer der Querschnitt ist. Um so schwächer wird somit die bewegende Kraft und um so langsamer werden die Schwingungen sein.

Die Periode wird andererseits um so länger sein, je länger das Rohr ist; um einen Liter Wasser aus dem einen Gefäß in das andere überzuführen, muß man das gesamte in dem Rohre enthaltene

Wasser in Bewegung setzen. Der zu überwindende Trägheitswiderstand ist also um so größer, und die Schwingungen sind um so langsamer, je länger das Rohr ist.

Wir haben im ersten Kapitel gesehen, daß der Querschnitt des Gefäßes der Kapazität, die Länge des Rohres der Selbstinduktion entspricht. Die Periode der elektrischen Schwingungen wird also um so länger sein, je größer die Kapazität und die Selbstinduktion sind.

4. Dämpfung.

Die Schwingungen eines Pendels halten, wie man weiß, nicht unbegrenzt an. Jede Schwingung geht weniger weit als die vorhergehende, und nach einer gewissen Anzahl von Hin- und Hergängen, die immer kleiner und kleiner werden, kommt das Pendel schließlich zur Ruhe.

Das rührt von der Reibung her. Wir haben nun gesehen, daß es bei den elektrodynamischen Erscheinungen eine Ursache gibt, welche dieselbe Rolle spielt wie die Reibung, nämlich den Ohmschen Widerstand. Die elektrischen Schwingungen müssen also gerade wie die Pendelschwingungen langsamer werden; sie müssen gedämpft sein, in ihrer Amplitude abnehmen und schließlich aufhören.

Die Reibung übt auf die Periode des Pendels nur einen unmerklichen Einfluß aus. Ebenso wird

in den meisten Fällen der Ohmsche Widerstand die Periode der elektrischen Schwingungen nicht merklich beeinflussen; sie werden zwar immer kleiner und kleiner werden, sie werden aber nicht viel weniger schnell werden.

Feddersen hat indessen bei gewissen Versuchen sehr große Widerstände angewendet; in solchen Fällen wird, wie vorauszusehen war, die Periode merklich länger.

Der Grenzfall ist der, wo die Ladung aufhört, eine oszillierende zu sein.

Denken wir uns ein Pendel, das sich in einem Medium von sehr großem Widerstande und sehr großer Zähigkeit bewege: Statt sich mit zunehmender Geschwindigkeit abwärts zu bewegen, wird es langsam sinken; es wird ohne Geschwindigkeit in seiner Gleichgewichtslage ankommen und nicht über diese hinausgehen. Es finden keine Schwingungen mehr statt.

So hat man Galvanometer gebaut, die man als *aperiodische* bezeichnet; bei diesen ist die Nadel in der Nähe eines kupfernen Reifens angeordnet, in dem sich Foucaultströme entwickeln, und muß nun, wenn sie sich bewegen will, einen beträchtlichen Widerstand überwinden, der wie eine richtige Reibung auf sie wirkt. Sie erreicht dann, statt nach beiden Seiten um ihre Gleichgewichtslage zu schwingen, wodurch die Beobachtung unbequem werden

würde, ihre Gleichgewichtslage ganz ruhig und bleibt in dieser Lage stehen.

Diese mechanischen Beispiele werden genügen, um erkennen zu lassen, was aus der Entladung der Leidener Flasche wird, wenn der Ohmsche Widerstand sehr groß ist.

Das elektrische Gleichgewicht wird langsam erreicht und wird nicht überschritten. Die Entladung ist nicht mehr oszillierend, sie ist kontinuierlich. Genau das haben die Versuche von Feddersen gezeigt, und sie bestätigen somit vollauf die Theorie von Lord Kelvin.

Die Reibung und die ihr analogen Widerstände sind nicht die einzige Ursache der Dämpfung, und nicht die gesamte lebendige Kraft der schwingenden Körper wird in Wärme umgewandelt.

Betrachten wir beispielsweise eine Stimmgabel, deren Schwingungen allmählich an Amplitude abnehmen. Zweifellos entsteht Reibung, und diese erwärmt die Stimmgabel ein wenig; gleichzeitig aber hören wir einen Ton; die Luft wird also in Bewegung versetzt, und sie entnimmt ihre lebendige Kraft aus der Stimmgabel. Ein Teil dieser lebendigen Kraft wird also durch eine Art Strahlung nach außen zerstreut.

Die Energie der elektrischen Schwingungen geht ebenfalls auf zweierlei Weise verloren: Der Ohmsche Widerstand verwandelt einen Teil dieser Energie in

Wärme; wir werden aber bald sehen, daß ein anderer Teil nach außen hin ausgestrahlt wird und dabei seine elektrische Gestalt beibehält. Das ist eine Tatsache, welche die Maxwellsche Theorie vorauszusehen gestattete, und welche mit der alten Elektrodynamik im Widerspruch steht.

Die elektrischen Schwingungen erleiden demnach eine zweifache Dämpfung, einmal durch den Ohmschen Widerstand (welcher der Reibung analog ist), und zweitens durch die Strahlung.

Viertes Kapitel.

Der Hertzsche Erreger.

1. Die Hertzsche Entdeckung.

Die Verschiebungsströme, welche die Maxwellsche Theorie voraussagte, konnten unter gewöhnlichen Verhältnissen ihre Existenz nicht offenbaren. Sie haben, wie wir sagten, einen elastischen Widerstand zu überwinden, der, während sie andauern, unaufhörlich wächst; sie können daher nur sehr schwach oder von sehr kurzer Dauer sein, *wenn sie immer in demselben Sinne verlaufen.* Wenn ihre Wirkungen merklich sein sollen, müssen sie also häufig ihre Richtung wechseln, die Wechsel müssen sehr schnell erfolgen. Die industriellen Wechselströme, ja selbst

die Feddersenschen Schwingungen sind für diesen Zweck völlig unzureichend.

Aus diesem Grunde eben haben die Maxwellschen Ideen zwanzig Jahre lang auf eine experimentelle Bestätigung warten müssen. Diese zu erbringen, war Hertz vorbehalten. Dieser Forscher, dessen Leben so kurz und dabei doch so reich an Erfolgen war, hatte anfänglich die Laufbahn eines Ingenieurs begonnen; ein unwiderstehlicher Drang trieb ihn aber bald zur reinen Wissenschaft hin. Helmholtz wurde bald auf ihn aufmerksam und förderte ihn sehr. Als Professor an der Karlsruher Hochschule vollendete er dann die Arbeiten, durch die sein Name unsterblich geworden ist; er trat eines Tages aus dem Dunkel in das Licht des Ruhmes. Doch er sollte sich seines Ruhmes nicht lange erfreuen: kaum, daß ihm die Zeit vergönnt war, sein neues Laboratorium in Bonn einzurichten; die eintretende Krankheit hinderte ihn, dessen Mittel zu verwerten, und bald raffte ihn der Tod dahin. Er hat uns jedoch außer seiner genialen Entdeckung Versuche von grundlegender Bedeutung über die Kathodenstrahlen hinterlassen, sowie ein sehr eigenartiges und tiefgründiges Werk über die Prinzipien der Mechanik.

2. Das Prinzip des Erregers.

Es handelte sich, wie ich auseinandergesetzt habe, darum, außerordentlich schnelle Schwingungen

zu erhalten. Nach dem, was wir im dritten Kapitel besprochen haben, würde es anscheinend genügen, die Versuche von Feddersen wieder aufzunehmen, aber die Kapazität und die Selbstinduktion zu vermindern. So beschleunigt man die Schwingungen eines Pendels, indem man es verkürzt.

Es genügt aber nicht, ein Pendel zu konstruieren; man muß es auch in Bewegung setzen. Dazu bedarf es irgend einer Ursache, die das Pendel aus seiner Gleichgewichtslage entfernt, und die dann plötzlich zu wirken aufhört, das heißt in einer Zeit, die im Vergleich zu der Dauer der Periode sehr kurz ist. Ohne eine solche Ursache wird das Pendel nicht schwingen.

Wenn man beispielsweise ein Pendel mit der Hand aus der Vertikallage entfernt, dann aber, statt es plötzlich loszulassen, den Arm allmählich nachgeben läßt, ohne indessen das Pendel aus den Fingern zu lassen, so wird das Pendel, das ja immer gehalten wird, ohne Geschwindigkeit in seine Gleichgewichtslage gelangen und nicht über sie hinausgehen.

Kurzum, die Dauer des Ausrückungsvorganges muß sehr kurz sein im Vergleich zu der einer Schwingung: Bei Perioden von $^1/_{100\,000\,000}$ Sekunde würde also keine mechanische Ausrückvorrichtung arbeiten, so schnell wirkend sie uns auch gegenüber unseren gewohnten Zeiteinheiten erscheinen mag.

Sehen wir nun, wie Hertz die Aufgabe gelöst hat.

Wir kehren zu unserem elektrischen Pendel (vgl. Seite 42) zurück und bringen in dem Drahte, der die beiden Konduktoren verbindet, eine Unterbrechung von einigen Millimetern an. Diese Unterbrechung teilt unseren Apparat in zwei symmetrische Hälften, und diese wollen wir mit den beiden Polen eines Rühmkorffschen Induktoriums verbinden. Der induzierte Strom wird unsere beiden Konduktoren laden, und die Potentialdifferenz zwischen ihnen wird verhältnismäßig langsam wachsen.

Anfangs wird die Unterbrechung verhindern, daß die Konduktoren sich entladen; die Luft an der Unterbrechungsstelle spielt die Rolle eines Isolators und hält unser Pendel aus seiner Gleichgewichtslage entfernt.

Wenn aber die Potentialdifferenz genügend groß geworden sein wird, so wird der Funken des Induktors überspringen und der auf den Konduktoren angesammelten Elektrizität einen Weg bahnen. Die Unterbrechungsstelle wird plötzlich aufhören zu isolieren, und unser Pendel wird durch eine Art elektrischer Auslösung von der Ursache befreit werden, welche es an der Rückkehr in seine Gleichgewichtslage gehindert hatte. Wenn ziemlich verwickelte Bedingungen, welche Hertz eingehend untersucht hat, erfüllt sind, so erfolgt diese Auslösung plötzlich genug, um die Entstehung von Schwingungen zu ermöglichen.

3. Verschiedene Formen des Erregers.

Die wesentlichen Teile eines Erregers sind folgende:

1. zwei äußere Konduktoren von verhältnismäßig großer Kapazität, denen das Induktorium anfänglich Ladungen von entgegengesetztem Vorzeichen zuführt, und welche ihre Ladungen bei jeder halben Schwingung austauschen;
2. ein Mittelleiter, in Gestalt eines Drahtes, durch den die Elektrizität von einem der Außenleiter zum andern übergeht;
3. ein in die Mitte des Mittelleiters eingeschaltetes Funkenmikrometer. Dieses ist der Sitz eines Widerstandes, der die Möglichkeit gewährt, das elektrische Pendel aus seiner Gleichgewichtslage zu entfernen; dieser Widerstand verschwindet dann plötzlich in dem Augenblick, wo der Funke überspringt, und dadurch wird dann das Pendel ausgelöst;
4. ein Induktorium, dessen beide Pole mit den beiden Hälften des Erregers in Verbindung stehen, und welches diesen ihre Anfangsladungen erteilt. Es vertritt gewissermaßen den Arm, der das Pendel aus seiner Gleichgewichtslage entfernt.

In dem ersten Hertzschen Erreger (Figur 1) bestanden die beiden äußeren Konduktoren aus zwei Kugeln von 15 cm Halbmesser und der Mittelleiter aus einem geraden Drahte von 150 cm Länge.

Hertz hat auch die beiden Kugeln durch zwei quadratische Platten ersetzt.

Wenn wir den Mittelleiter zu einem Rechteck zusammenbiegen und die beiden Platten einander nähern, so daß sie die beiden Belegungen eines Plattenkondensators bilden, so haben wir den Erreger von Blondlot (Fig. 2). Blondlot hat diesen Erreger hauptsächlich als Resonator verwendet.

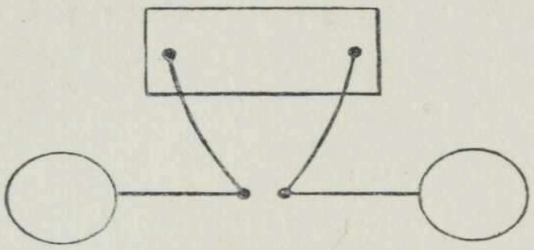

Fig. 1.

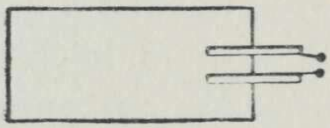

Fig. 2.

Man braucht nur den Plattenkondensator durch eine Leidener Flasche zu ersetzen und den Verbindungsdraht zu verlängern, um wieder zu dem Apparat von Feddersen zu gelangen, dessen Schwingungen genügend langsam erfolgen, um eine mechanische Betätigung der Auslösung zu gestatten.

Wenn wir nun den Mittelleiter fortlassen, so erhalten wir den *Erreger von Lodge*, der nur aus zwei Kugeln besteht, zwischen denen ein Funke übergeht. Statt zweier Kugeln verwendet Lodge gewöhnlich deren drei oder vier. Wir werden diesen Apparat in viel kleineren Abmessungen bei den Versuchen von Righi und von Bose im elften Kapitel wiederfinden.

Wenn wir hingegen die Außenleiter fortlassen und die Länge des Verbindungsdrahtes auf 30 cm herabsetzen, so erhalten wir den *kleinen Hertzschen Erreger.* Bei diesem ist die Ladung, statt sich an den Enden zu verdichten, auf die ganze Länge des Drahtes verteilt.

4. Die Rolle des Funkens.

Man ersieht, wie wichtig es ist, daß der Funke „gut" ist, das heißt, daß er plötzlich übergeht, also in einem gegen die Dauer der Schwingung sehr kurzen Zeitraum. Tausend Umstände sind von Einfluß auf die Beschaffenheit des Funkens. Zunächst muß er zwischen zwei Kugeln überspringen; er würde schlecht sein, wenn er zwischen zwei Spitzen oder zwischen einer Kugel und einer Spitze überginge.

Dann müssen die Oberflächen dieser Kugeln gut poliert sein. An der Luft oxydieren sie sich schnell und müssen oft gereinigt werden.

Schließlich muß der Abstand zwischen den Kugeln passend gewählt werden. Dadurch gerade wird die Amplitude der Schwingungen bestimmt. Um Schwingungen von großer Amplitude zu erhalten, müßte man das Pendel weit aus seiner Gleichgewichtslage entfernen können, das heißt, man müßte den beiden Hälften des Erregers bedeutende Ladungen erteilen können, ehe der Funke überspringt.

Nun springt der Funke über, sobald die Potentialdifferenz einen bestimmten Wert erreicht hat, der um so größer ist, je größer die Funkenstrecke ist. Das würde dazu führen, diese Strecke zu vergrößern, aber das kann man nicht, ohne daß der Funke aufhört, gut zu sein.

Man lernt sehr bald die guten und die schlechten Funken an ihrem Aussehen und an ihrem Schall voneinander unterscheiden.

5. Einfluß des Lichtes.

Hertz hat ferner eine sehr merkwürdige Tatsache beobachtet: Der primäre und der sekundäre Funke schienen einen mysteriösen Einfluß aufeinander auszuüben. Wurde ein Schirm zwischen beide eingeschaltet, so hörte die Bildung der sekundären Funken auf. Hertz glaubte anfänglich, daß es sich hierbei um eine elektrische Wirkung handle; er erkannte dann aber, daß diese Erscheinung von dem Lichte des Funkens herrührt.

Indessen verhinderte eine Glasplatte, welche das Licht hindurchläßt, die Wirkung der Funken aufeinander. Das kommt daher, daß in diesem Falle die wirksamen Strahlen gerade die ultravioletten sind, und diese werden eben von dem Glase zurückgehalten. In der Tat läßt eine Flußspatplatte, welche den ultravioletten Strahlen den Durchgang gestattet, auch die Wirkung der Primärfunken bestehen. Diese Ent-

deckung sollte der Ausgangspunkt für wichtige Arbeiten werden, die indessen unserem Gegenstande fern liegen.

6. Verwendung von Öl.

Sarasin und de la Rive haben einen großen Fortschritt dadurch erreicht, daß sie den Funken in Öl überspringen ließen. Bei dieser Anordnung oxydieren sich die Kugeln des Funkenmikrometers nicht mehr, die unaufhörliche Reinigung wird unnötig, und die Funken sind viel regelmäßiger. Schließlich ist das Durchbruchspotential größer als in Luft, und man kann daher das elektrische Pendel weiter aus seiner Gleichgewichtslage entfernen, bevor der Funke die Auslösung bewirkt. Die Amplitude der Schwingungen wird somit eine größere.

Allerdings hat man in der drahtlosen Telegraphie, wo man beträchtliche Spannungen anwendet, von der Verwendung von Öl abgesehen, die eine Komplikation bedeutet. Mit Rücksicht auf die große Kapazität der Konduktoren, das heißt auf die großen Elektrizitätsmengen, die zur Verwendung gelangen, ist dieses Vorgehen möglich. Unter solchen Verhältnissen können die Funken trotz ihrer Länge gut bleiben.

7. Wert der Wellenlänge.

Auf Grund verschiedener theoretischer Betrachtungen kann man voraussagen, daß der oben be-

schriebene große Hertzsche Erreger Schwingungen erzeugt, deren Frequenz 50000000 in der Sekunde beträgt.

Man bezeichnet bekanntlich als *Wellenlänge* den Weg, den die Störung während der Dauer einer Schwingung durchläuft; wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieselbe ist wie die des Lichtes, nämlich 300000 km in der Sekunde, so wird die Wellenlänge der fünfzigmillionste Teil von 300000 km, also 6 m, sein.

Dieselben Betrachtungen gestatten auszusagen, daß der kleine Hertzsche Erreger zehnmal schnellere Schwingungen und demzufolge eine zehnmal kleinere Wellenlänge liefern wird.

Wir werden weiter unten sehen, daß diese theoretischen Voraussagungen durch die direkte Messung der Wellenlängen ihre Bestätigung gefunden haben.

Fünftes Kapitel.

Hilfsmittel der Beobachtung.

1. Prinzip des Resonators.

Ein ~~Resonator~~ Erreger? erzeugt in dem umgebenden Raume Verschiebungsströme und Induktionswirkungen; oder besser: er erweckt durch Induktion eine Störung in einem Punkte eines Drahtes, und diese Störung

pflanzt sich dann längs dieses Drahtes fort. Wir müssen noch sehen, wie man diese Wirkungen nachweisen kann.

Zu diesem Zwecke bedient man sich gewöhnlich des Resonators. Wenn eine Stimmgabel schwingt, so übertragen sich ihre Schwingungen auf die umgebende Luft, und wenn sich in der Nähe eine andere Stimmgabel befindet, die mit der ersten in Einklang steht, so gerät auch sie ihrerseits in Schwingung. Ebenso ruft ein elektrischer Erreger in dem ihn umgebenden Felde eine Störung hervor und läßt einen zweiten Erreger, den man in dieses Feld bringt, in Schwingung geraten, wenn die Schwingungsperiode beider dieselbe ist. Der Erreger wird somit zu einem Resonator.

Es besteht indessen ein großer Unterschied zwischen der akustischen Resonanz und der elektrischen. Ein akustischer Resonator spricht sehr gut auf erregende Schwingungen an, die vollkommen mit seiner Eigenschwingung im Einklang stehen. Er spricht praktisch überhaupt nicht an, wenn die Perioden nur im geringsten voneinander verschieden sind. Ein elektrischer Resonator spricht auf erregende Schwingungen, mit denen er im Einklang steht, gut an; er spricht etwas weniger gut auf solche an, deren Periode ein wenig abweicht, und recht schlecht auf solche, die beträchtlich mit ihm in Dissonanz stehen.

Der Grund für diese Verschiedenheit liegt in folgendem: Die akustischen Schwingungen klingen langsam ab, ihre Amplitude ist merklich konstant; die elektrischen Schwingungen klingen schnell ab. Aus diesem Grunde ist die Resonanz weniger scharf und gleichsam etwas verschwommen.

Ein Resonator ist nichts weiter als ein Erreger, bei dem das überflüssig gewordene Induktorium fortgelassen worden ist. Dieses Induktorium dient ja nur dazu, den Erreger aufzuladen, und hier soll das äußere Feld den Resonator in Bewegung setzen.

Übrigens könnte jede Erregerform als Resonator verwendet werden. Gewöhnlich läßt man die beiden äußeren Konduktoren fort und verwendet nur zwei Typen, den *offenen Resonator,* bei welchem der Draht oder Mittelleiter geradlinig bleibt, oder den *geschlossenen Resonator,* bei welchem er zu einem Kreise gebogen ist, so daß seine beiden Enden einander sehr nahe kommen.

2. Wirkungsweise des Resonators.

Wenn sich der Ton in einer Orgelpfeife fortpflanzt, so wird er an dem einen Ende reflektiert, geht dann zurück, wird am anderen Ende reflektiert, geht nochmals in umgekehrter Richtung zurück, und so fort. Alle diese reflektierten Wellen interferieren miteinander, verstärken sich, wenn sie übereinstimmen, und vernichten sich im gegenteiligen Falle. Auf

diese Weise werden gewisse Töne verstärkt, andere vernichtet.

Der Mechanismus des elektrischen Resonators ist vollkommen ähnlich. Die Störung pflanzt sich längs des Drahtes fort und wird an beiden Enden reflektiert. Durch die Übereinanderlagerung aller dieser reflektierten Wellen werden solche elektrische Schwingungen verstärkt, die eine passende Periode besitzen.

Ich habe oben erklärt, weshalb es notwendig ist, die Erreger mit einem Funkenunterbrecher zu versehen, der die Auslösung des elektrischen Pendels plötzlich bewirkt. Hier liegt derselbe Grund nicht mehr vor, weil hier das äußere Feld den Resonator in Erschütterung versetzt. Es genügt aber nicht, daß der Resonator schwingt, wir müssen auch wissen, daß er schwingt. Als Merkmal dafür dient uns der Funke; wir werden also in der Mitte eines offenen Resonators eine Funkenstrecke beibehalten. Die so in dem Resonator erzeugten sekundären Funken sind viel kürzer als die primären Funken im Erreger, sie haben eine Länge von nur einigen Hundertsteln eines Millimeters.

Beim geschlossenen Resonator beschränkt man sich darauf, die beiden Enden einander genügend zu nähern, damit der Funke zwischen ihnen überspringen kann. Wenn dann die Amplitude der Schwingungen recht groß wird, so kann die Potentialdifferenz zwischen den beiden Enden einen

Wert erreichen, der für den Übergang des Funkens genügt; nur dann erhalten wir Kenntnis von dem Vorhandensein der Schwingungen. Es ist geradeso, als ob Wasser in einem Gefäße schwingen würde und wir dies erst in dem Augenblicke bemerken würden, wenn die Schwingung hinreichend stark geworden ist, daß ein wenig Wasser überläuft.

Wenn die beiden Enden einer Pfeife geschlossen wären, so würde die halbe Wellenlänge gleich der ganzen Pfeifenlänge sein; analog wird die halbe Wellenlänge der Eigenschwingung eines Resonators gleich der ganzen Länge des Drahtes sein, wenn die beiden Enden keine Kapazität haben; ein solches Drahtende ist dann dem geschlossenen Ende einer Pfeife vergleichbar; der Strom ist nämlich in diesem Punkte, über den die Elektrizität nicht hinweggehen kann, und in dem sie sich nicht ansammeln kann, gleich Null.

Dies gilt nicht mehr, sobald die Kapazität der beiden Drahtenden merklich wird, und aus diesem Grunde ist die halbe Wellenlänge eines geschlossenen Resonators etwas größer als die Drahtlänge.

Dieser Sachverhalt wird uns das Verständnis für die Wirkungsweise des offenen Resonators erleichtern. Ein Draht *AD* sei in der Mitte durch eine Funkenstrecke *BC* unterbrochen. Diese Unterbrechungsstelle ist sehr kurz, nur einige Hundertstel Millimeter lang; das Ende *B* des Stückes *AB* und

das Ende *C* des Stückes *CD* bilden also gleichsam die Belegungen eines Kondensators, dessen isolierende Schicht sehr dünn ist, und der demzufolge eine beträchtliche Kapazität hat; sie werden sich demnach mehr nach Art des *offenen* Endes einer Pfeife verhalten als nach Art des geschlossenen.

Wenn der Funke übergeht, so schwingt der ganze Resonator *AD* nach Art einer Pfeife, deren beide Enden geschlossen sind, und die halbe Wellenlänge ist *AD*. Wenn der Funke nicht übergeht, so schwingt jede der beiden Hälften des Resonators, *AB* und *CD*, für sich allein, aber nach Art einer Pfeife, die an dem einen Ende offen und an dem anderen geschlossen ist. Die halbe Wellenlänge ist also doppelt solang wie *AB*, das heißt wiederum gleich *AD*.

3. Verschiedene Verwendungsweisen des Funkens.

Man kann die Verwendung des Resonators vermeiden, der gewisse Oberschwingungen verstärkt und dadurch die Schwingung verzerrt. Wir wollen uns vorstellen, die Störung pflanze sich längs eines Drahtes fort, und zwei Punkte des Drahtes seien nahe beieinander. Die Störung wird den ersten dieser beiden Punkte früher erreichen als den anderen, so daß in einem Augenblick zwischen diesen beiden Punkten eine Potentialdifferenz besteht; wenn diese Potentialdifferenz groß genug ist, so wird ein Funke

überspringen. Nach diesem Verfahren und durch Veränderung der Drahtlänge zwischen den beiden Punkten, zwischen denen man den Funken übergehen läßt, ist es Pérot und Birkeland gelungen, genügende Bedingungen zu erhalten, um die Form der Störung bestimmen zu können.

Ob man einen Resonator verwendet, oder nicht, jedenfalls ist leicht zu verstehen, wie der Funke der Messung zugänglich ist. Eine Schraube gestattet, die beiden Enden des Unterbrechers mehr oder weniger weit voneinander zu entfernen, und man sucht nun die Entfernung auf, in welche man diese beiden Enden bringen muß, damit die Funken anfangen überzuspringen.

Die Erscheinung wird viel brillanter, wenn man ein Geißlersches Rohr verwendet. Eine mit verdünntem Gase gefüllte Röhre leuchtet nämlich auf, wenn man sie in das von einem Erreger hervorgerufene Wechselfeld bringt.

4. Thermische Verfahren.

Statt die Funken zu beobachten, kann man auch die Erwärmung betrachten, welche durch die oszillatorischen Ströme hervorgerufen wird, sei es nun in einem Resonator oder in dem Drahte, längs dessen sich die Störung fortpflanzt.

Um die Erwärmung der Leiter zu beobachten, kann man verschiedene Mittel anwenden: Man kann

1. die infolge der Erwärmung auftretende Verlängerung messen; oder
2. die Widerstandsänderung messen; oder aber
3. thermoelektrische Sonden verwenden.

I. Die Messung der Verlängerung ist wenig genau, trotz der geistreichen Anordnungen, die man hierfür zur Anwendung gebracht hat. Wir wollen deshalb hierbei nicht länger verweilen, ebenso wenig auch bei den Versuchen, bei denen man die Bewegung der warmen Luft in einem den Leitungsdraht umgebenden Rohre benutzt hat.

II. Die Messung der Widerstandsänderung liefert ausgezeichnete Ergebnisse. Man arbeitet dabei mit dem Bolometer: die beiden Zweige einer gewöhnlichen Wheatstoneschen Brückenschaltung werden von dem Strome einer Batterie durchflossen; außerdem läßt man durch einen der Zweige den oszillatorischen Strom gehen.

Wir wollen annehmen, das Galvanometer G stehe auf Null, und wollen nun anfangen, die Schwingungen etwa durch einen Teil des Zweiges AB gehen zu lassen; der Zweig AB erwärmt sich, sein Widerstand wird geringer, das Gleichgewicht wird gestört und das Galvanometer abgelenkt. Dieses Verfahren ist außerordentlich empfindlich; hat Tissot es doch anwenden können, um auf 40 km Entfernung Wellen der drahtlosen Telegraphie nachzuweisen.

III. Man schickt den Wechselstrom durch einen feinen Draht, in dessen unmittelbarer Nähe (in ungefähr $^1/_{10}$ mm Abstand) man das Thermoelement anordnet. Dieses Verfahren ist von durchaus hinreichender Empfindlichkeit.

5. Mechanische Verfahren.

Die mechanischen Verfahren beruhen teils auf der elektrostatischen Anziehung, teils auf der Wechselwirkung zwischen den Strömen; es scheint auf den ersten Blick, als wären sie außerstande, die Hertzschen Schwingungen nachzuweisen. Diese Schwingungen sind nämlich viel zu schnell, als daß irgend ein mechanisches Organ allen Änderungen der elektrischen oder magnetischen Erscheinungen zu folgen vermag: alles, was man erhalten kann, ist der Mittelwert der Erscheinung.

Beispielsweise würde ein Galvanometer, das eine Reihe wechselnder Impulse von entgegengesetztem Richtungssinne empfängt, in Ruhe bleiben; der Mittelwert der Erscheinung würde Null sein.

Dasselbe wäre der Fall, wenn man die Quadranten eines Elektrometers mit einem Apparate verbinden würde, in welchem Schwingungen entstehen, und die Nadel auf ein konstantes Potential bringen würde. Die Elektrisierung der Nadel würde immer dasselbe Vorzeichen beibehalten, die der Quadranten würde in jedem Augenblicke das Vorzeichen wech-

seln; ihre Wirkung aufeinander würde somit ihren Sinn wechseln, und ihr Mittelwert würde wiederum Null sein.

Bjerknes hat deshalb eine andere Anordnung benutzt, um eine mechanische Wirkung zu erreichen. Er verwendet ein Quadrantenelektrometer, von dem er nur zwei einander gegenüberliegende Quadranten beibehalten hat. Diese Quadranten werden mit je einem der beiden Enden eines Resonators verbunden, der, was wohl zu beachten ist, so angeordnet ist, daß er keine Funken gibt. Die Elektrometernadel ist isoliert.

In einem bestimmten Augenblick wird sich die Nadel durch Influenz an einem Ende mit positiver Elektrizität, am anderen mit negativer laden; die Quadranten üben auf sie eine gewisse Wirkung aus. Nach einer halben Periode hat das Vorzeichen der Ladung der Quadranten gewechselt, aber die Elektrisierung der Nadel durch Influenz hat gleichfalls ihren Sinn geändert, so daß der Sinn der Wirkung sich nicht geändert hat.

6. Vergleichung der verschiedenen Verfahren.

Es besteht ein großer Unterschied zwischen den Verfahren, die sich auf den Funken gründen, und den thermischen oder mechanischen Verfahren.

Der Funke springt entweder über, oder nicht. Damit er übergehe, genügt es, daß *in irgendeinem*

Augenblick das Potential genügend hoch gewesen ist. Der Funke gibt uns also über die *Maximalamplitude der Schwingung* Aufschluß.

Die thermischen oder mechanischen Verfahren dagegen lehren uns nur Mittelwerte kennen; sie geben uns Aufschluß über die *mittlere Amplitude der Schwingung.*

Bjerknes hat gleichzeitig beide Arten des Verfahrens angewendet und ist dadurch imstande gewesen, die Dämpfung der Eigenschwingung eines Resonators zu messen.

Es leuchtet nämlich ein, daß das Verhältnis zwischen der mittleren Amplitude und der Maximalamplitude um so kleiner ist, je schneller die Schwingung abklingt. Die Gegenüberstellung der beiden Verfahren setzt uns nun in den Stand, dieses Verhältnis genau zu messen.

Sechstes Kapitel.

Der Kohärer.

1. Radiokonduktoren.

Branly hat einen viel empfindlicheren Empfänger ersonnen, den er *Radiokonduktor* nennt, und der auf einem vollkommen anderen Prinzip beruht. Seine Anwendungsgebiete sind von solcher Bedeutung, daß

ich mich veranlaßt sehe, diesem Gegenstande ein besonderes Kapitel zu widmen. Der Radiokonduktor hat auch den Namen *Kohärer* erhalten.

Denken wir uns ein Glasrohr, dessen Querschnitt ziemlich eng sein möge, und das mit Metallfeilspänen gefüllt sei. Jedes einzelne Stückchen dieses Feilichts ist ein guter Leiter der Elektrizität; aber die Elektrizität begegnet einem beträchtlichen Widerstand, wenn sie von einem Stück auf das andere übergehen will; der gesamte Widerstand des Apparates äußert sich somit fast ausschließlich an den gegenseitigen Berührungspunkten der einzelnen Stückchen.

Die Erfahrung lehrt nun, daß dieser Widerstand beträchtlich geringer wird, wenn der Apparat Hertzschen Strahlungen ausgesetzt wird, das heißt, wenn er den Induktionskräften ausgesetzt wird, welche in der Umgebung eines Hertzschen Erregers auftreten, und welche sehr oft in der Sekunde ihren Richtungssinn wechseln.

Auf die Erklärung dieser Erscheinung werde ich weiter unten zurückkommen; einstweilen will ich mich auf die Mitteilung beschränken, daß man ähnliche Wirkungen beobachtet hat, als der Radiokonduktor nicht Hertzschen Strahlungen ausgesetzt wurde, sondern anderen Einflüssen ganz anderer Natur, die aber auch periodischen Charakter und sehr kurze Periode haben, beispielsweise Schallwellen.

Wie dem auch sei, die Hertzschen Strahlungen wirken jedenfalls so, als ob sie die Berührung zwischen den einzelnen Teilchen des Feilichts zu einer innigeren machten. Eine Erschütterung oder eine Temperaturerhöhung genügt alsdann, um dem Radiokonduktor seinen ursprünglichen Widerstand zurückzugeben.

Wir wollen also jetzt annehmen, in den Stromkreis einer Batterie werde ein Radiokonduktor eingeschaltet, und dieser werde den von einem Hertzschen Erreger erzeugten Strahlungen ausgesetzt. Wenn der Erreger nicht arbeitet, so wird der Radiokonduktor nur von einem Teile des Gleichstromes durchflossen werden, den die Batterie liefert, im anderen Falle auch von sehr schnellen Wechselströmen, die von der Induktion herrühren, die der Erreger ausübt. In diesem letzteren Falle aber setzen die Wechselströme den Widerstand herab, der Gleichstrom wird viel stärker, und das Galvanometer zeigt seine Zunahme an.

Für gewöhnlich isoliert der Kohärer, weil die Berührung zwischen den einzelnen Feilichtkörnchen schlecht ist und der Strom aus der Batterie nicht übergehen kann. Wenn aber der Kohärer von einer Hertzschen Welle getroffen wird, so wird er leitend, und der Strom geht über. Ein leichter Stoß genügt dann, damit er seine Leitfähigkeit verliert und der Strom aufhört.

Eine sehr schwache Welle *löst* also sozusagen den Batteriestrom *aus*, und es steht nichts im Wege, diese Batterie so stark zu wählen, daß sie zum Betriebe eines Morseapparates, direkt oder unter Zwischenschaltung eines Relais, ausreicht. Der Batteriestrom wird also das Vorhandensein der Wellen anzeigen.

2. Theorie des Kohärers.

Der Kohärer hat viele verschiedene Gestalten erhalten. Zunächst hat man verschiedene Feilichtarten oder *verschiedenartige* Gemische von Feilspänen verwendet. Es scheint eine wesentliche Bedingung zu sein, daß die verwendeten Metalle leicht oxydierbar sind; wahrscheinlich bedecken sich die Körnchen mit einer dünnen Oxydschicht, die sich dem Durchgange des Stromes entgegenstellt. Feilspäne nicht oxydierbarer Metalle würden den Strom immer hindurchlassen. Allerdings darf die Oxydschicht nicht zu dick sein, da sonst die Röhre immer ein Isolator bleiben würde, selbst bei Gegenwart Hertzscher Schwingungen. Aus diesem Grunde empfiehlt Lodge, die Röhre zu versiegeln und auszupumpen, wenn die Metalle genügend stark oxydiert sind. Man kann auch mit Silberfeilicht gute Ergebnisse erzielen, wenn es an seiner Oberfläche leicht von Schwefel angegriffen ist; die Schwefelsilberschicht spielt dann dieselbe Rolle wie die Oxydschicht.

Man hat ferner Kohärer aus nicht oxydierbarem Feilicht hergestellt, dabei aber für die Elektroden oxydierbare Metalle gewählt. Wahrscheinlich tritt dann der Widerstand an der Berührungsstelle des Feilichts mit den Elektroden auf.

Durch Versuche ist man zu der günstigsten Mischung gelangt; das von Marconi benutzte Gemisch enthält 96 v. H. Nickelfeilicht und 4 v. H. Silberfeilicht.

Die zahlreichen Berührungsstellen zwischen den Feilichtkörnchen sind nicht unumgänglich erforderlich; es ist gelungen, Kohärer herzustellen, bei denen nur eine einzige Berührungsstelle oder eine kleine Anzahl von Berührungsstellen zwischen Metallteilchen von merklichen Abmessungen vorkommt, beispielsweise zwischen kleinen Kügelchen oder kleinen Federn aus Stahl, die aneinander liegen.

Andererseits hat man Kohärer gebaut, bei denen der empfindliche Kontakt zwischen Kohle und Metall, oder zwischen Kohle und Kohle (wie im Mikrophon) liegt. Solche Kohärer erfreuen sich einer wichtigen Eigenschaft; sie sind *selbstentfrittend,* das heißt, sie nehmen nach dem Durchgang der Welle von selbst ihren ursprünglichen Widerstand wieder an, ohne daß man nötig hätte, ihnen eine Erschütterung zu geben. Diese Eigenschaft kann offenbar wertvoll werden, wenn es sich um die Verwendung für Zwecke des Fernsprechens handelt;

will man nämlich Telephonie ohne Draht betreiben, so sind die zu übertragenden Zeichen Schallschwingungen, und diese folgen bei den hohen Tönen sehr rasch aufeinander. Es würde also dann unmöglich sein, dem Kohärer durch mechanische Hilfsmittel nach jeder einzelnen Schwingung seinen verlorenen Widerstand aufs neue zu erteilen.

Schließlich seien noch die Apparate erwähnt, die man als *Antikohärer* bezeichnet hat, und deren Widerstand unter der Einwirkung der Hertzschen Wellen wächst statt abzunehmen. Diese Apparate haben verschiedene Formen erhalten. Die bemerkenswerteste setzt sich aus zwei übereinanderliegenden Platten zusammen. Der Kontakt der beiden Platten bietet einen gewissen Widerstand, und dieser wird kleiner, wenn die Platten angefeuchtet werden; der ursprüngliche Widerstand tritt aber wieder auf, wenn die feuchten Platten elektrischen Wellen ausgesetzt werden. Die Antikohärer haben indessen bisher noch keine praktische Anwendung erfahren.

Endlich hat man in jüngster Zeit mit großem Erfolge Kohärer verwendet, die man als *elektrolytische* bezeichnet. Bei diesen tritt der veränderliche Widerstand nicht an der Berührungsstelle zweier Metalle, sondern an der Berührungsstelle einer metallischen Elektrode mit einem flüssigen Elektrolyten auf.

3. Erklärung der Erscheinungen.

Die geschilderten Erscheinungen bedürfen der Erklärung. Man hat der Feilichtröhre zwei verschiedene Namen gegeben: Lodge hat sie *Kohärer* genannt und Branly *Radiokonduktor*. Diese beiden Benennungen entsprechen durchaus verschiedenen theoretischen Vorstellungen. Branly nimmt an, daß die Hertzschen Strahlungen das Dielektrikum verändern, welches die einzelnen Feilichtkörnchen voneinander trennt. Lodge meint, daß die Hertzschen Wellen zwischen diesen Körnchen Funken überspringen lassen, welche die isolierenden Oxydschichten durchbrechen, von den Feilichtkörnchen kleine Teilchen abreißen und aus diesen Teilchen Brücken herstellen, die dann sozusagen diese Körnchen aneinanderschweißen. Diese Brücken würden, wenn sie einmal hergestellt sind, so lange bestehen bleiben, bis ein Stoß sie zerbrechen läßt; bei den selbstentfrittenden Apparaten wären sie noch zerbrechlicher und würden verschwinden, sobald der Durchgang der Strahlung aufhört.

Die meisten Physiker haben sich der Auffassung von Lodge angeschlossen; verschiedene Forscher haben nämlich unter dem Mikroskop direkt die Entstehung der Funken und die Bildung der Brücken zu beobachten vermocht. Allerdings haben sie dabei nicht unter Bedingungen gearbeitet, die mit den

in der praktischen Telegraphie auftretenden völlig identisch wären.

Viel schwerer noch ist nach dieser Anschauungsweise die Wirkungsweise solcher Kohärer zu erklären, bei denen die Feilichtkörner in einem festen Dielektrikum eingebettet sind, wie beispielsweise in Paraffin. Man nimmt an, daß die Funken in dem Paraffin kleine Kanäle aushöhlen, deren Wände sich mit Metallstaub überziehen. Bei den Antikohärern würden sie in der Weise wirken, daß sie kleine ursprünglich vorhandene metallische Brücken zur Verdampfung brächten, oder daß sie das Wasser, mit dem die Platten angefeuchtet sind, teilweise in Dampf verwandelten. All diese Erklärungen sind aber einstweilen noch recht hypothetisch.

4. Wirkungsweise des Kohärers.

Der Kohärer muß reguliert werden. Zu diesem Zwecke nähert man die beiden Elektroden einander mehr oder weniger, um den Druck der Feilichtkörnchen aufeinander zu verändern. Wenn dieser Druck zu groß ist, so geht der Strom jederzeit über; wenn er zu schwach ist, so reichen die Hertzschen Wellen nicht mehr aus, um dem Strom den Durchgang zu öffnen. Zwischen gewissen Grenzen des Druckes aber wird der Widerstand, der von der Größenordnung eines Megohm ist, unter dem Einfluß der Strahlen plötzlich millionenmal

kleiner und fällt auf die Größenordnung eines Ohm.

Überlegt man sich die Sache nach der Erklärungsweise von Lodge, so erscheint die außerordentliche Empfindlichkeit des Kohärers weniger außergewöhnlich. Für das Arbeiten des Kohärers genügt es, daß der Funke übergeht, und für den Funkenübergang wieder genügt es, daß in *irgendeinem Augenblick* die Potentialdifferenz einen gewissen Grenzwert erreicht. (Dieser Grenzwert ist übrigens sehr klein, weil die Zwischenräume zwischen den Feilichtkörnchen nur von mikroskopischer Größe sind.) Es hängt also alles von der *maximalen* Erschütterung ab. Diese nun kann beträchtlich sein, wenngleich die gesamte Energie nur sehr schwach sein mag, weil nämlich die Dauer der Störung sehr kurz ist.

Es hat wenig Bedeutung, daß dieser Höchstwert nur während eines Augenblickes erreicht wird, denn sobald der Funke übergesprungen ist, bilden sich die Brücken und lassen den Strom der Stationsbatterie hindurchgehen. Die Wirkung der Welle bleibt also bestehen, bis ein Stoß sie aufhebt. Wir haben hier etwas Ähnliches wie beim „Beharren der Eindrücke", denen unsere Netzhaut zum Teil ihre Empfindlichkeit verdankt.

Man kann den Branlyschen Empfänger mit dem oben beschriebenen Bolometer vergleichen: Bei beiden Apparaten besteht die Wirkung der Hertzschen

Schwingungen darin, daß sie den Widerstand eines von einem Gleichstrom durchflossenen Leiters verändern; aber die Widerstandsänderung beruht in den beiden Fällen auf sehr verschiedenen Ursachen, nämlich im einen Falle auf der Erwärmung des Drahtes, im anderen auf einer innigeren Berührung zwischen den Feilichtteilchen.

Der Radiokonduktor ist übrigens unendlich viel empfindlicher. Wir werden ihn bei den im elften Kapitel beschriebenen Versuchen von Bose wiederfinden. Er hat auch die Telegraphie ohne Draht möglich gemacht.

Von einem gewissen Gesichtspunkte aus kann man sogar sagen, daß der Kohärer ein zu empfindlicher Apparat sei; er gestattet nämlich keine Abstufungen: entweder arbeitet er vollkommen, oder er arbeitet überhaupt nicht, weil er nur ein Auslösungsapparat ist. Er vermag also nicht, den Resonator bei der Messung der Wellenlängen oder in den anderen oben geschilderten Versuchen zu ersetzen.

Hätte Hertz nur den Kohärer gekannt, so würde er niemals vermocht haben, die Periodizität der elektrischen Schwingungen darzutun und die Wellenlängen zu messen. Dafür ist auf allen praktischen Anwendungsgebieten der Kohärer ein Detektor, der allen übrigen unendlich weit überlegen ist.

Man hat den Radiokonduktor benutzt, um zu untersuchen, ob die Sonne Hertzsche Strahlungen

aussendet; das Ergebnis ist negativ gewesen. Vielleicht werden diese Strahlungen von der Sonnenatmosphäre absorbiert.

Zweifellos lehrt die Erfahrung, daß die Gase bei gewöhnlichem Druck für diese Strahlungen ziemlich durchlässig sind. Gilt aber dasselbe auch für stark verdünnte Gase? Wir sahen, daß ein Geißlersches Rohr in einem Felde, in dem Hertzsche Schwingungen entstehen, aufleuchtet. Es leuchtet nicht auf, ohne Energie zu absorbieren; die verdünnten Gase absorbieren also die Hertzschen Strahlungen, und möglicherweise werden die Strahlen, welche die Sonne aussenden kann, von dem oberen Teile der beiden Atmosphären absorbiert, woselbst der Druck sehr gering ist.

5. Magnetische Detektoren.

In neuerer Zeit hat Marconi einen Detektor ersonnen, der auf einem vollkommen abweichenden Prinzip beruht. Die Hertzschen Wellen sollen nämlich die Eigenschaft besitzen, die Hysterese der Magnete zu vernichten. Bekanntlich wird ein Stück Eisen, das man in ein Magnetfeld bringt, magnetisch, aber diese Magnetisierung bedarf einer gewissen Zeit, um sich zu bilden. Es folgt daraus, daß in einem veränderlichen Magnetfelde die Änderungen der Magnetisierung gegenüber denen des sie hervorbringenden Feldes im Rückstande sind. Diese Verzögerung nun bezeichnet man als Hysterese, und sie ver-

schwindet unter der Einwirkung der Hertzschen Wellen. Unter Nutzbarmachung dieser Eigenschaft kann man einen Wellendetektor konstruieren, der ebenso empfindlich sein soll wie der Branlysche Kohärer.

Denken wir uns nämlich, ein Stück Eisen sei von einer Drahtspule umgeben, welche durch ein Telephon geschlossen ist. Wenn sich die Magnetisierung des Eisens ändert, so werden in der Spule induzierte Ströme entstehen, die dann ihrerseits durch das Telephon fließen werden.

Unter normalen Verhältnissen, wenn das Magnetfeld sich langsam ändert, wird sich auch die Magnetisierung des Eisens langsam und mit einer geringen Verzögerung infolge der Hysterese ändern, und man wird im Telephon keinen Ton hören.

Wir wollen jetzt den Erreger arbeiten lassen. Bei jeder Unterbrechung im Primärkreise des Rühmkorffschen Induktoriums wird der Erreger eine Reihe von Schwingungen aussenden. Unter dem Einfluß dieser Schwingungen wird das Eisen seine Hysterese verlieren, und seine Magnetisierung wird *plötzlich* ihre Verzögerung einholen (gerade wie ein Barometer plötzlich vorrückt, wenn man es anstößt). Wir werden also gerade so viele plötzliche Änderungen der Magnetisierung erhalten, wie wir Unterbrechungen des Primärkreises im Induktorium haben, und das Telephon wird einen Ton geben, der ebenso viele Schwingungen in der Sekunde

macht, wie der Hammer dieses Induktoriums Unterbrechungen.

Wir wollen nur nebenher einige andere Detektoren von außerordentlicher Empfindlichkeit erwähnen. Dahin gehört der elektrolytische Detektor, der im wesentlichen aus einer sehr feinen metallischen Spitze besteht, die in ein mit einer Säure gefülltes Gefäß eintaucht. Diese Elektrode wird polarisiert, so daß der Batteriestrom nicht hindurchgehen kann; die elektrischen Wellen vernichten diese Polarisation und gestatten dem Strom den Durchgang. — Hierhin gehört ferner das *Audion,* das aus einer Glühlampe besteht, in welche eine Elektrode hineinragt. Zwischen dem Leuchtfaden und der Elektrode entsteht ein Strom, den man durch ein Galvanometer oder durch einen telephonischen Empfänger leiten kann.

Wenn man diese Glühlampe in ein oszillierendes elektromagnetisches Feld bringt, so erfährt der Strom Änderungen, die man durch das Telephon hörbar machen kann. Es ist wohl zu beachten, daß die Hertzschen Schwingungen selbst viel zu schnell sein würden, um unmittelbar einen wahrnehmbaren Ton zu geben. Um einen solchen zu erhalten, wird man die Intensität dieser Wellen in der Weise ändern, daß die Periode dieser Änderungen von derselben Größenordnung ist wie die Periode der Schallschwingungen.

Siebentes Kapitel.

Fortpflanzung längs eines Drahtes.

1. Erzeugung der Störungen in einem Drahte.

Ein Hertzscher Erreger bringt in dem ihn umgebenden Felde Induktionskräfte hervor. Bringt man in dieses Feld einen langen Metalldraht, so entwickeln diese Induktionskräfte in dem Teile des Drahtes, der dem Erreger zunächst gelegen ist, Wechselströme, das heißt eine elektromagnetische Störung, die sich längs des ganzen Drahtes fortpflanzen wird.

Will man die elektromagnetischen Störungen zwingen, einen Draht zu durchlaufen, so kann man verschiedene Verfahren anwenden. Wir wollen aus diesen das elektrostatische Verfahren von Hertz und das elektromagnetische Verfahren von Blondlot herausgreifen.

Die Methode von Hertz. — Zwei Platten, *A* und *B*, von großer Kapazität vertreten die beiden Kugeln des Erregers (Fig. 3). — Diesen beiden Platten stehen zwei weitere Platten, *A'* und *B'*, gegenüber, und in der Mitte jeder der beiden letztgenannten Platten ist ein Draht von einer gewissen Länge befestigt. Dadurch wird die Kapazität der Platten *A* und *B* vergrößert, da mit jeder von ihnen eine Art Kondensator gebildet wird.

Wenn der Erreger in Bewegung gerät, so lädt sich eine der Platten, beispielsweise *A*, positiv, die andere, *B*, negativ; nach Verlauf einer halben Schwingung wechseln die Ladungen ihre Vorzeichen, und derselbe Vorgang wiederholt sich nach Verlauf gleicher Zeiten.

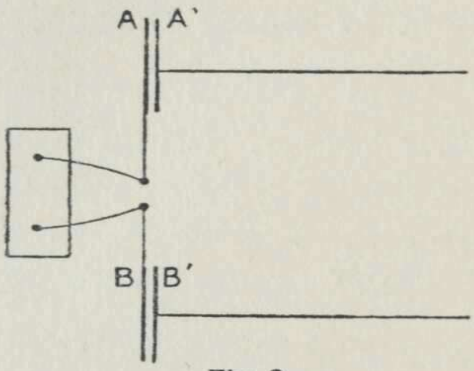

Fig. 3.

Die Platten *A'* und *B'* laden sich durch Influenz mit entgegengesetztem Vorzeichen wie die Platten *A* und *B*, und die Drähte werden zum Sitz eines Schwingungsvorganges, dessen Periode die des Erregers ist.

Die Methode von Blondlot. — Der Erreger hat die Gestalt eines gekrümmten Drahtes, der in eine Art Kondensator ausläuft (Fig. 4). Um diesen ersten Draht ist ein zweiter gelegt, der sich in einem geradlinigen Draht von großer Länge fortsetzt. Die beiden kreisförmigen Drähte werden durch Überziehen mit einer Kautschukschicht voneinander isoliert.

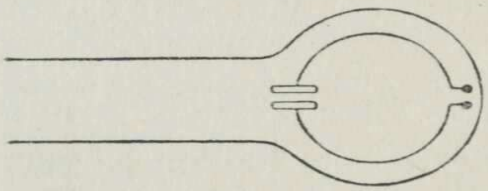
Fig. 4.

Wenn die Schwingungen auftreten, so ist der Erreger der Sitz periodischer Ströme, die zu induzierten Strömen von derselben Periode im zweiten Drahte Anlaß geben.

2. Art der Fortpflanzung.

Ist nun die Fortpflanzung einer Hertzschen Störung, also eines Wechselstromes hoher Frequenz, in allen Punkten mit der Fortpflanzung eines Gleichstromes vergleichbar, wie ihn eine Batterie liefern würde?

Eine erste Verschiedenheit ist den Forschern seit langer Zeit aufgefallen: Ein Gleichstrom verbreitet sich gleichförmig über den ganzen Querschnitt des Leiters.

Das gilt schon nicht mehr für die Wechelströme geringer Frequenz, wie sie in der elektrischen Industrie zur Verwendung gelangen. In der Achse des Leiters ist der Strom beinahe Null, an der Oberfläche ist seine Intensität viel größer. Es verhält sich alles so, als ob der Strom an der Oberfläche den mittleren Teil des Leiters gegen die äußeren Einflüsse seitens der durch ihn wachgerufenen Induktionskräfte schützte.

Bei den Hertzschen Schwingungen, deren Periode viel kürzer ist, darf man erwarten, dieselbe Erscheinung in verstärktem Maße zu finden. Man dürfte außer in einer äußerst dünnen Schicht an der Oberfläche keinen Strom mehr haben. Bjerknes hat diese Voraussage durch ein sehr geistreiches Verfahren bestätigt gefunden.

Ich habe oben (Seite 64) die Methode angegeben, nach welcher dieser Gelehrte die Dämpfung eines

Resonators mißt. Diese Dämpfung ist abhängig von dem Material, aus dem der Draht gefertigt ist. Sie ist für einen Resonator aus Eisen nicht dieselbe wie für einen Resonator aus Kupfer.

Bjerknes überzieht nun auf elektrolytischem Wege den Eisenresonator mit einer Kupferschicht und den Kupferresonator mit einer Eisenschicht. Sobald die Dicke dieser Schicht ein Hundertstel Millimeter erreicht, verhält sich der Eisenresonator so, als wäre er aus Kupfer, und der Kupferresonator so, als wäre er aus Eisen.

Das ist ein Zeichen dafür, daß die Ströme auf eine Schicht beschränkt bleiben, deren Dicke von der Größenordnung eines Hundertstel Millimeters ist. Dieses Ergebnis steht in Übereinstimmung sowohl mit der alten Theorie als auch mit der Maxwellschen.

Die Maxwellsche Theorie gestattet aber noch eine weitere Eigentümlichkeit vorauszusagen, welche leider einer unmittelbaren Bestätigung durch den Versuch nicht zugänglich ist. Die in einem Drahte fließenden Wechselströme rufen Induktionskräfte in der den Draht umgebenden Luft hervor.

Nach Maxwell müssen diese Induktionskräfte zur Entstehung von Verschiebungsströmen in der Luft selbst Veranlassung geben.

Wir hätten somit bei Gleichstrom Leitungsströme in der ganzen Masse des Leiters, und in der um-

gebenden Luft nichts; wir hätten dagegen bei Wechselströmen hoher Frequenz Leitungsströme in der Oberflächenschicht des Leiters, nichts in seinem zentralen Teil, und Verschiebungsströme in der Luft.

3. Fortpflanzungsgeschwindigkeit und Diffusion.

Kirchhoff hat die Geschwindigkeit einer beliebigen elektrischen Störung zu berechnen versucht. Er nahm zunächst an, daß der Leiter ein vollkommener sei, und daß der Strom, der ja dann keinen Ohmschen Widerstand finden würde, nur die Selbstinduktion zu überwinden habe, welche eine ähnliche Rolle spielt wie die Trägheit. Kirchhoff wies nach, daß unter diesen Verhältnissen die Fortpflanzungsgeschwindigkeit gleich dem Verhältnis der Einheiten, das heißt gleich der Lichtgeschwindigkeit, nämlich gleich 300000 km in der Sekunde, ist.

Die Fortpflanzung erfolgt weiter regelmäßig: Wenn sich die Störung zu Anfang auf ein gewisses Gebiet des Drahtes, beispielsweise von 1 m Länge, beschränkt findet, so wird nach Verlauf von einer hunderttausendstel Sekunde die Stirnfläche der Welle um 3 km und das Ende der Welle gleichfalls um 3 km fortgeschritten sein; die Entfernung der Stirnfläche vom Ende wird sich somit nicht geändert haben, und die Störung wird auch jetzt noch nur eine Länge von 1 m auf dem Drahte einnehmen.

Diese theoretischen Bedingungen finden sich aber in den natürlichen Leitern nicht verwirklicht. Diese setzen vielmehr den Strömen außer der Selbstinduktion noch einen der Reibung vergleichbaren Ohmschen Widerstand entgegen. Was geschieht nunmehr? Die Stirnfläche der Welle wird immer noch mit derselben Geschwindigkeit, der Lichtgeschwindigkeit, fortschreiten; das Ende aber wird viel weniger schnell fortschreiten, und die Länge, welche die Störung einnimmt, wird infolgedessen immer größer werden. So verlängert sich eine Kolonne auf einer Straße, wenn sie Nachzügler zurückläßt. Man bezeichnet diese Erscheinung als die *Diffusion des Stromes.*

Die Diffusion ist um so weniger zu fürchten, je kürzer die Periode der Schwingungen ist. Praktisch kann man von den Hertzschen Schwingungen sagen, daß sie keine Diffusion mehr haben, und daß sich alle Leiter so verhalten, als wären sie vollkommen.

Nicht, als würde ihr Ohmscher Widerstand kleiner! Im Gegenteil, er wird größer, denn der Strom benutzt ja nur die äußerste Oberflächenschicht des Leiterquerschnitts. Aber die Selbstinduktion, die von den Änderungen der Stromstärke abhängt, wächst noch viel schneller, weil nämlich diese Änderungen außerordentlich schnell erfolgen, und so kann der Ohmsche Widerstand gegenüber der Selbstinduktion vernachlässigt werden.

Diese Folgerungen lassen sich nach der alten Theorie und nach der Theorie von Maxwell voraussagen. In diesem Punkte stimmen nämlich die beiden Theorien überein. Wir werden sehen, daß diese Voraussagungen durch die Erfahrung bestätigt werden.

4. Die Versuche von Fizeau und Gounelle.

Die Versuche von Fizeau und Gounelle sind im Jahre 1850 nach einer Methode angestellt worden, die auf demselben Prinzip beruht wie das berühmte Verfahren von Fizeau zur Messung der Lichtgeschwindigkeit.

Der Umfang eines hölzernen Rades, das sich mit großer Geschwindigkeit drehte, war in 36 Sektoren geteilt, und diese bestanden abwechselnd aus Platin und aus Holz. Zwei Drähte endeten in je einer Metallbürste, die auf dem Umfange dieses Rades schleifte, und konnten so abwechselnd miteinander in metallische Verbindung gesetzt oder voneinander isoliert werden. Es waren ferner drei Bürstenpaare vorhanden, deren Anordnung sogleich erörtert werden soll.

Der eine Pol der Batterie war zur Erde abgeleitet, der andere mit einem ersten Drahte *AB* verbunden, der in der Bürste *B* endete. Ferner führte der Leitungsdraht *CDEE'* von der Bürste *C* zu dem Endpunkte *D* der Linie und ging dann zu den beiden

Bürsten E und E' zurück. Schließlich verbanden die beiden Drähte $F'G'$ und FG' die Bürsten F und F' mit der Erde.

Die Sektoren des Rades konnten B mit C, E mit F und E' mit F' in Verbindung setzen, und die Anordnung war so getroffen, daß die Verbindungen BC und EF zur selben Zeit geöffnet und geschlossen wurden, und daß andererseits die Verbindung $E'F'$ geschlossen wurde, wenn die beiden anderen geöffnet wurden, und umgekehrt.

Wir wollen zunächst sehen, was geschehen müßte, wenn sich die Elektrizität mit einer vollkommen bestimmten Geschwindigkeit fortpflanzte, wie das Licht und der Schall. Wir wollen als Periode die Zeit bezeichnen, welche zwischen dem Moment verstreicht, in welchem eine der Bürsten mit einem der Sektoren in Berührung tritt, und dem Moment, wo diese Berührung aufhört, das heißt den sechsunddreißigsten Teil der Dauer einer vollen Umdrehung des Rades. Diese Periode wird um so kürzer sein, je schneller die Umdrehung des Rades erfolgt.

Wir wollen annehmen, die Dauer T der Fortpflanzung längs der Leitung CDE sei gleich einer geraden Anzahl Perioden. Die aus der Batterie kommende Elektrizität wird in dem Augenblicke von B nach C übergehen, in welchem die Verbindung BC geöffnet wird; sie wird die Leitung durchlaufen und nach Verlauf der Zeit T in E und in E'

anlangen. In diesem Augenblick wird die Verbindung *EF* offen und die Verbindung *E'F'* geschlossen sein, und der Strom wird in den Draht *FG* fließen.

Wenn hingegen *T* gleich einer ungeraden Anzahl von Perioden wäre, so würde die Elektrizität bei ihrer Ankunft in *E* und *E'* die Verbindung *EF* geschlossen und die Verbindung *E'F'* offen finden, und der Strom würde in den Draht *F'G'* fließen.

Die Umdrehungsgeschwindigkeit könnte also so bemessen werden, das der Strom ganz und gar in *FG* oder ganz und gar in *F'G'* fließt. Bei dazwischen liegender Umdrehungsgeschwindigkeit würde sich der Strom in ungleichem Verhältnis auf die beiden Drähte verteilen.

Die beiden Drähte *FG* und *F'G'* waren um ein Differentialgalvanometer gelegt und wirkten auf dieses in entgegengesetztem Sinne. Durch Beobachtung des Galvanometers war man somit in der Lage, zu entscheiden, ob die mittlere Stromstärke in *FG* stärker war als die mittlere Stromstärke in *F'G'*.

Man konnte also sehen, wie groß die Umdrehungsgeschwindigkeit sein müßte, damit *T* gleich einem gegebenen Vielfachen der Periode würde. Man konnte also *T*, und folglich auch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit messen.

Verschiedene Umstände, auf die wir später noch zurückkommen werden, trugen dazu bei, die Erscheinungen zu komplizieren, und es ergab sich, daß der

Strom in *FG* (oder auch in *F'G'*) niemals ganz verschwand und nur einen Wechsel von Höchst- und Mindestwerten aufwies, von denen nur die ersteren zu beobachten waren.

Die Beobachtungen von Fizeau und Gounelle ergaben für die Geschwindigkeit in Eisen 100000 km und in Kupfer 180000 km in der Sekunde.

5. Diffusion des Stromes.

Ich sagte soeben, daß die Stromstärke in *FG* niemals ganz verschwindet, wie das der Fall sein müßte, wenn sich die Elektrizität mit einer vollkommen bestimmten Geschwindigkeit fortpflanzte. Der ganze Verlauf ist so, als ob die Störung bei ihrer Fortpflanzung verwischt würde, so daß sie bei ihrer Ankunft eine größere Länge auf dem Drahte einnehmen würde als bei ihrem Ausgang. Diese Erscheinung ist durch die Versuche von Fizeau außer Zweifel gestellt worden, und Fizeau hat sie die Diffusion des Stromes genannt.

Ich habe oben (Seite 82) die Gründe auseinander gesetzt, aus denen diese Diffusion vorauszusehen war. Die Folgen dieser Diffusion sind leicht zu ersehen. Es muß schließlich alles so verlaufen, als wenn ein Teil der Elektrizität sich genau mit der Geschwindigkeit des Lichtes bewegte, während der übrige Teil mit einer geringeren und im übrigen veränderlichen Geschwindigkeit nachfolgte. Wir

hätten also eine starke Tete unserer Kolonne, die mit einer Geschwindigkeit von 300000 km in der Sekunde vorrückte, aber hinter sich Nachzügler zurückließe, die sich über die Route zerstreuten.

Die Fizeausche Methode mißt nicht die Höchstgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit der Tete unserer Kolonne, sondern die mittlere Geschwindigkeit, die beträchtlich geringer sein muß. Dadurch erklärt es sich, daß die beobachtete Geschwindigkeit viel geringer ist als 300000 km in der Sekunde.

Die mittlere Geschwindigkeit in Eisen ist kleiner als die in Kupfer, und zwar aus zwei Gründen: einmal, weil das Eisen magnetisch ist und dadurch infolge der transversalen Magnetisierung die Selbstinduktion erhöht wird; und zweitens, weil der spezifische Widerstand des Eisens größer ist als der des Kupfers, wodurch der Einfluß der Diffusion erhöht wird.

Die Versuche von Fizeau stehen somit nicht in Widerspruch mit der Theorie.

6. Die Versuche von Blondlot.

Die vorstehende Erörterung zeigt zur Genüge, wie sehr sich die Fortpflanzung eines Gleichstromes, oder auch eines intermittierenden Stromes oder eines Wechselstromes von geringer Frequenz, von der Fortpflanzung der Hertzschen Störungen unterscheidet.

Diese letzteren sind nämlich von kurzer Dauer und bestehen aus Schwingungen, deren Periode außerordentlich kurz ist.

Wir haben also Grund zu der Annahme, daß der Einfluß der Diffusion zu vernachlässigen sein wird, daß der zurückbleibende Rest sehr schwach sein wird, und daß die mittlere Geschwindigkeit außerordentlich nahe an die Geschwindigkeit der Stirnfläche der Welle, das heißt an den Wert 300000 km in der Sekunde herankommen wird.

Aus den Versuchen, über die ich soeben berichtet habe, ließen sich also hinsichtlich dieser Störungen keinerlei Folgerungen ziehen, und es bedurfte weiterer Untersuchungen. Dieser Umstand veranlaßte Blondlot, folgende Versuche anzustellen:

Sein Apparat besteht aus zwei symmetrischen Leidener Flaschen, F und F', von geringer Kapazität. Die inneren Belegungen, A und A', sind durch einen Draht verbunden, der in halber Länge durch ein Funkenmikrometer unterbrochen wird. Die beiden Enden dieses Funkenmikrometers sind mit einem Rühmkorffschen Induktorium verbunden. Das gesamte System, bestehend aus den beiden Belegungen A und A', dem sie verbindenden Drahte und dem Funkenmikrometer, stellt einen richtigen Erreger dar, den wir mit E bezeichnen wollen.

Die äußere Belegung jeder der beiden Flaschen F und F' ist in zwei voneinander isolierte Teile

geteilt. Wir wollen die beiden Teile der äußeren Belegung von F mit B und C, die der äußeren Belegung von F' mit B' und C' bezeichnen.

B und B' sind auf zweierlei Weise miteinander verbunden:

1. durch eine feuchte Schnur;
2. durch einen kurzen Metalldraht, der in der Mitte durch ein Funkenmikrometer unterbrochen ist, dessen beide Enden von zwei metallischen Spitzen, P und P', gebildet werden.

Ebenso sind C und C' auf zweierlei Weise miteinander verbunden:

1. durch eine feuchte Schnur;
2. durch einen Leitungsdraht. Dieser Leitungsdraht führt zunächst von der Belegung C zu dem Punkte D am Ende der Linie und kehrt dann von D zu der oben erwähnten Spitze P zurück; die Elektrizität muß, nachdem sie durch die Funkenstrecke hindurchgegangen ist, von der Spitze P' aus nach dem Punkte D' am Ende der Linie gehen und dann von D' aus zur Belegung C' zurückkehren. Die Telegraphenstangen tragen also vier Drähte: CD, DP, $P'D'$, $D'C'$, und die Elektrizität muß, um auf diesem Wege von C nach C' durch das Funkenmikrometer zu gehen, viermal die Länge durchlaufen, zweimal auf dem Hinweg und zweimal auf dem Rückweg.

Man kann also von B zu B' oder von C zu C' auf zwei Wegen gelangen, nämlich durch eine feuchte Schnur von großem Widerstand, oder durch einen metallischen Weg, der aber durch ein Funkenmikrometer unterbrochen wird.

Wenn die Potentialänderungen langsam verlaufen, so wird die gesamte Elektrizität durch die feuchte Schnur gehen; die Potentialdifferenz zwischen den beiden Spitzen P und P' wird nämlich niemals groß genug werden, daß der Funke überschlägt, und das Funkenmikrometer wird ein Isolator bleiben.

Wenn dagegen die Änderungen schnell verlaufen, so wird der Funke überschlagen und der Elektrizität einen Weg durch das Mikrometer PP' bahnen; dann wird nahezu die gesamte Elektrizität über den metallischen Weg gehen, und durch die feuchte Schnur wird nur eine wegen des großen Widerstandes dieser Schnur zu vernachlässigende Menge gehen.

Der Apparat wird in folgender Weise arbeiten: Das Induktorium wird die inneren Belegungen A und A' laden, etwa A positiv und A' negativ. Die Belegungen B und C werden sich positiv laden. Es muß also eine gewisse Elektrizitätsmenge von B nach B' und von C nach C' gehen; da aber die Änderungen verhältnismäßig langsam verlaufen, so wird diese Elektrizität durch die feuchten Schnüre gehen.

In einem bestimmten Augenblick wird der Funke des Erregers E überschlagen. Dieser Funke ist os-

zillierend, wie aus seinem Aussehen zur Genüge hervorgeht. Die Belegungen A und A' werden sich plötzlich entladen; infolgedessen werden die auf den Belegungen B, C, B', C' angesammelten Elektrizitätsmengen plötzlich und gleichzeitig frei werden. Die Elektrizität wird also von B' nach B und von C' nach C zurückfließen, aber dieses Mal auf dem metallischen Wege, weil die Veränderungen plötzlich erfolgen.

Es werden also in dem Funkenmikrometer PP', das der den beiden metallischen Wegen BB' und CC' gemeinsame Teil ist, zwei Funken überspringen. Der erste Funke wird in dem Augenblick übergehen, in welchem die von B ausgehende Störung in P ankommt, der zweite Funke in dem Augenblick, wo die von C ausgehende Störung in P anlangt. Da der Weg BC sehr kurz ist, so wird der zwischen den beiden Funken verstreichende Zeitraum gleich der Zeit sein, welche die Störung braucht, um den Weg CDP zu durchlaufen. Diese Strecke CDP wollen wir nun die Länge der Linie nennen. Sie ist doppelt so lang wie der Leitungsdraht CD, der zum Ende der Linie führt, und gleich der Hälfte des genannten Weges $CDPP'D'C'$.

Der Zeitraum zwischen dem Übergang der beiden Funken wurde mit Hilfe eines rotierenden Spiegels geschätzt, der das Licht der Funken auf eine lichtempfindliche Platte warf; es war nichts weiter nötig,

als den gegenseitigen Abstand der beiden auf dieser Platte erhaltenen Bilder zu messen.

Die ersten Versuche, bei denen die Länge der Linie etwas mehr als 1 km betrug, ergaben im Mittel eine Geschwindigkeit von 293000 km in der Sekunde; mit einer Linienlänge von 1800 m wurde dann im Mittel eine Geschwindigkeit von 298000 km in der Sekunde gefunden.

Achtes Kapitel.

Messung der Wellenlänge und multiple Resonanz.

1. Stehende Wellen.

Aus den vorstehend beschriebenen Versuchen geht hervor, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit längs eines Drahtes dieselbe ist wie die des Lichtes. Wollen wir nun die Anzahl der Schwingungen in der Sekunde haben, so brauchen wir nur noch die Wellenlänge zu messen und durch diese Länge den in einer Sekunde zurückgelegten Weg, also 300000 km, zu dividieren.

Zu diesem Zwecke hat Hertz die Erscheinung der stehenden Wellen zu benutzen versucht. Denken wir uns eine periodische Störung, die sich längs eines Drahtes fortpflanze; wenn sie am Ende des

Drahtes angekommen sein wird, so wird sie reflektiert werden und zurückkommen. Es werden sich daher die direkte Störung und die reflektierte Störung zusammensetzen müssen. Zwei periodische Störungen verstärken sich, wenn sie in gleicher Phase sind, das heißt, wenn die diesen beiden Störungen entsprechenden Wechselströme zur selben Zeit positiv oder zur selben Zeit negativ sind; sie vernichten einander, wenn sie in entgegengesetzter Phase sind, das heißt, wenn die der einen entsprechenden Ströme in dem Augenblicke positiv sind, wo die der anderen entsprechenden negativ sind, oder umgekehrt.

Die beiden Störungen, die direkte und die reflektierte, sind in gleicher Phase, verstärken sich also, wenn ihr Gangunterschied eine ganze Anzahl von Wellenlängen beträgt; die betreffenden Stellen des Drahtes, an denen die Wirkung einen Höchstwert hat, nennt man *Bäuche*.

Diese beiden Störungen sind dagegen in entgegengesetzter Phase, heben sich also gegenseitig auf, wenn ihr Gangunterschied ein ungerades ganzes Vielfaches einer halben Wellenlänge beträgt; die betreffenden Stellen des Drahtes, an denen die Wirkung Null ist, nennt man *Knoten*.

Der Abstand zweier aufeinanderfolgender Knoten ist gleich der halben Wellenlänge.

Es seien nun *A* und *B* zwei solcher Knoten; in *A* muß der Gangunterschied eine ungerade Anzahl

halber Wellenlängen betragen, beispielsweise $(2n + 1)$ halbe Wellenlängen. Die direkte Welle geht nun, nachdem sie durch A hindurchgegangen ist, über B hin; dagegen wird die reflektierte Welle über B hingehen, bevor sie durch A geht. Gehen wir also vom Punkte A zum Punkte B, so wird der Weg, den die direkte Welle zurückgelegt hat, um die Strecke AB vermehrt sein, während der von der reflektierten Welle durchlaufene Weg um die Strecke AB kleiner geworden ist. Der Gangunterschied ist also um $2\,AB$ kleiner geworden. Da nun aber der Punkt B ein Knotenpunkt ist, so muß dieser neue Gangunterschied wiederum eine ungerade ganze Anzahl halber Wellenlängen ausmachen, also $(2n - 1)$ halbe Wellenlängen betragen. Es muß somit $2\,AB$ genau gleich einer Wellenlänge sein.

Wir haben hier die Erscheinung der stehenden Wellen, wie sie sich Hertz zuerst dachte, und aus der er ein einfaches Hilfsmittel für die Messung der Wellenlängen zu gewinnen hoffte.

Leider sind, wie wir sehen werden, die Dinge etwas verwickelter.

Die Reflexion am Ende des Drahtes kann in verschiedener Weise vor sich gehen. Wenn der Draht aufhört, ohne in eine Kapazität auszulaufen, so kann sich die Elektrizität am Ende nicht ansammeln, der Strom muß dort also verschwinden, und das Ende ist ein Knoten.

Das Gegenteil ist der Fall, wenn der Draht in eine beträchtliche Kapazität ausläuft, wenn beispielsweise die beiden parallelen Drähte, die in den Figuren 3 und 4 gezeichnet sind, in den beiden Belegungen eines Kondensators enden; in diesem Falle ist das Ende ein Bauch.

Man kann auch die Enden dieser beiden parallelen Drähte miteinander verbinden. Dann wird die Störung, nachdem sie den einen der beiden Drähte in direktem Sinne durchlaufen hat, über den anderen Draht, den sie in umgekehrter Richtung durchläuft, zurückkehren; sie wird mit der Störung, die diesen zweiten Draht in direkter Richtung durchläuft, interferieren und dadurch ebenfalls stehende Wellen hervorbringen.

2. Multiple Resonanz.

Ich habe oben (Seite 55) gesagt, daß ein Resonator gut auf einen Erreger anspricht, mit dem er vollkommen in Einklang steht, daß er aber auch noch, wenn auch weniger gut, auf einen Erreger anspricht, dessen Periode von der seinen abweicht.

Daraus ergibt sich, daß man, wenn auch weniger leicht, mit einem Erreger und einem Resonator arbeiten kann, deren Perioden beträchtlich voneinander verschieden sind. Das haben Sarasin und de la Rive getan.

Dabei haben sie ein unerwartetes Gesetz gefunden, das sie als das Gesetz der multiplen Resonanz bezeichnet haben: Der Abstand zwischen zwei Knoten, der nach dem vorstehend Ausgeführten eine halbe Wellenlänge messen soll, ändert sich, wenn man unter Beibehaltung desselben Erregers den Resonator wechselt; er ändert sich nicht, wenn man unter Beibehaltung desselben Resonators den Erreger wechselt.

Was man mißt, ist also etwas dem Resonator Eigentümliches; der Knotenabstand ist also die halbe Wellenlänge der Eigenschwingung des Resonators und nicht die halbe Wellenlänge der Schwingung des Erregers.

Sarasin und de la Rive haben folgende Erklärung angegeben: Die von dem Erreger ausgehende Störung ist komplex und entsteht aus der Übereinanderlagerung einer unendlichen Anzahl einfacher Schwingungen, welche man als ihre Komponenten bezeichnen kann. Es ist gerade so, wie bei einer Lichtquelle, die kein monochromatisches Licht aussendet, sondern weißes Licht, das ein kontinuierliches Spektrum liefert.

Jeder Resonator spricht nur auf eine dieser Komponenten an; wenn man einen Resonator verwendet, so mißt man die Wellenlänge dieser Komponente, und die übrigen Komponenten sind ohne Einfluß. Mit anderen Worten, man mißt die Wellenlänge der Eigenschwingung des Resonators.

Der Sachverhalt ist gerade so wie in der Akustik, wo ein aus mehreren harmonischen Partialtönen gebildeter zusammengesetzter Klang durch einen Resonator analysiert werden kann, der nur den einen dieser Obertöne bestehen läßt.

3. Andere Erklärung.

Es ist noch eine andere Erklärungsweise möglich: Die Schwingungen, welche ein Erreger aussendet, müssen sehr schnell abklingen; ihre Energie wird nämlich sogleich durch den Widerstand des Funkens in Wärme umgewandelt oder durch Strahlung zerstreut.

Was geschieht dann? Wie wir oben erörtert haben, verstärkt die reflektierte Welle die direkte oder beeinträchtigt sie, und aus ebendieser Vereinigung der beiden Wellen gehen die stehenden Wellen hervor. Betrachten wir nun aber einen Punkt *A*, der ein wenig vom Ende des Drahtes entfernt sein möge: Während der Zeit, welche die Störung braucht, um von dem Punkte *A* zu diesem Ende zu laufen und dann nach der Reflexion von diesem Ende wieder zum Punkte *A* zurückzukehren, während dieser Zeit, sage ich, hat die direkte Welle Zeit genug gehabt, zu verklingen; wenn also die reflektierte Welle ankommt, wird die direkte bereits aufgehört haben; es kann also keine Vereinigung zwischen beiden erfolgen, und es können infolgedessen keine stehenden Wellen auftreten.

Stehende Wellen im eigentlichen Sinne werden also nur in der Nähe des Drahtendes auftreten.

Indessen beobachtet man *bei Anwendung eines Resonators* abwechselnd Knoten und Bäuche in allen Teilen des Drahtes. Wie geht das zu?

Um dies zu erklären, brauchen wir nur anzunehmen, daß die Schwingungen des Resonators viel weniger schnell gedämpft werden als die des Erregers. Wenn die direkte Welle hindurchgeht, so versetzt sie den Resonator in Schwingung; wenn die reflektierte Welle zurückkommt, so ist die direkte Welle im Drahte erloschen, aber der Resonator hat nicht zu schwingen aufgehört. Er wird also einen zweiten Stoß erhalten; wird nun dieser zweite Stoß die Amplitude dieser Schwingungen vergrößern oder verkleinern?

Wir wollen ein Gleichnis wählen.

Ein Pendel empfängt einen ersten Anstoß, durch den es, sagen wir einmal von links nach rechts, bewegt wird. Nach einer halben Schwingung wird es sich von rechts nach links bewegen, nach einer ganzen Schwingung wird es wieder von links nach rechts gehen. Allgemein wird es nach einer ganzen Anzahl von Schwingungen von links nach rechts gehen, es wird nach einer ungeraden Anzahl von halben Schwingungen von rechts nach links gehen.

Nehmen wir jetzt an, das Pendel empfange einen zweiten Anstoß *im gleichen Sinne.* Wenn dieser An-

stoß nach einer ganzen Anzahl von Schwingungen erfolgt, in dem Augenblicke, wo das Pendel von links nach rechts geht, so wird er die Geschwindigkeit zu vermehren trachten; wenn er nach einer ungeraden Anzahl von halben Schwingungen erfolgt, in dem Augenblicke, wo das Pendel von rechts nach links geht, so wird er die Geschwindigkeit zu vermindern trachten.

Ebenso steht es mit dem Resonator: Dieser Apparat empfängt einen ersten Anstoß im Augenblicke des Durchganges der direkten Welle, einen zweiten im Augenblicke des Durchganges der reflektierten Welle. Wenn zwischen diesen beiden Stößen eine ganze Anzahl von Schwingungen des Resonators erfolgt ist, das heißt wenn der Gangunterschied der beiden Wellen eine ganze Anzahl von Wellenlängen *des Resonators* beträgt, so verstärken sich die Wirkungen der beiden Stöße gegenseitig, und wir beobachten einen Schwingungsbauch. Wenn dagegen der Gangunterschied eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen des Resonators ausmacht, so sind die Wirkungen der beiden Stöße einander entgegengerichtet, und wir beobachten einen Schwingungsknoten.

Fassen wir das Gesagte zusammen, so muß der Abstand zweier Knoten gleich der halben Wellenlänge des Resonators sein. Die Wellenlänge des Erregers kommt dabei gar nicht in Betracht.

Ehe wir weiter gehen, mögen noch ein paar Bemerkungen betreffs dieser zweiten Erklärungsweise hier Platz finden.

Ich habe oben geschildert, was erfolgt, wenn die beiden Stöße, die das Pendel empfängt, in demselben Sinne verlaufen; die Wirkung würde die gegenteilige sein, wenn sie in einander entgegengesetztem Sinne verlaufen würden. Man kann sich nun leicht darüber Rechenschaft geben, daß der von der direkten Welle herrührende Anstoß und der von der reflektierten Welle herrührende entweder in demselben Sinne oder in einander entgegengesetztem Sinne verlaufen können, einerseits je nach der Art, wie die Reflexion erfolgt ist (vgl. oben Seite 94—95), andererseits je nach der Lage des Resonators. So erklären sich auf die einfachste Weise die Versuchsergebnisse von Turpain, die manchen Leuten paradox erschienen sind, und die sich schon aus der Symmetrie zur Genüge erklären lassen.

Man kann sich ferner die Frage vorlegen, warum denn der Apparat, der aus zwei langen Drähten gebildet wird, nicht mit einem großen Resonator zu vergleichen ist und ohne Unterschied auf Erregungen aller Perioden anspricht. Wenn keine Dämpfung vorhanden wäre, so würden die reflektierten Wellen in der oben geschilderten Weise (siehe Seite 56) zur Interferenz führen und Resonanzwirkungen hervorbringen. Das ist aber nicht der Fall; wenn eine der

reflektierten Wellen einen Punkt des Drahtes erreicht, so ist die direkte Welle längst erloschen, und es findet keine Interferenz statt.

4. Die Versuche von Garbasso und von Zehnder.

Zwischen diesen beiden Erklärungsweisen kann nur der Versuch entscheiden.

Zehnder hat versucht, das kontinuierliche Spektrum, das die Theorie von Sarasin und de la Rive erwarten läßt, direkt zu beobachten. Er verwendet eine Art von Gitter, durch welches er die verschiedenen Komponenten der von dem Erreger ausgehenden zusammengesetzten Schwingung voneinander trennen will, ganz nach Art des gewöhnlich in der Optik angewandten Gitters, durch welches man die verschiedenen Farben voneinander trennt, aus denen sich das weiße Licht zusammensetzt.

Garbasso versuchte, durch eine komplizierte Versuchsanordnung, auf deren Erklärung ich mich hier nicht einlassen kann, die Dispersion nachzuahmen, wie sie ein Prisma bei seiner Wirkung auf weißes Licht hervorbringt.

Diese Forscher haben beide die von ihnen erwarteten Ergebnisse erhalten, ein Umstand, der als eine Bekräftigung der Erklärungsweise von Sarasin und de la Rive erscheinen sollte.

Diese Versuche scheinen entscheidend zu sein, sind es aber nicht. Es läßt sich nämlich durch eine

einfache Rechnung zeigen, daß eine gedämpfte Schwingung sich so verhält wie eine zusammengesetzte Schwingung, die ein kontinuierliches Spektrum besitzt, *in welchem die Intensitäten nach einem besonderen Gesetz verteilt sind.*

Es genügt also nicht, den Nachweis zu erbringen, daß die von dem Erreger ausgesandte Schwingung sich so verhält, als ob sie ein kontinuierliches Spektrum besitzt; man muß auch nachweisen, daß in diesem Spektrum die Intensitäten der verschiedenen Komponenten sich nicht nach diesem besonderen Gesetz ändern.

5. Messung der Dämpfung.

Weit entfernt davon, geht vielmehr aus einer Versuchsreihe, über die ich jetzt berichten will, hervor, daß nicht nur die Intensitäten sich nach diesem Gesetze ändern, sondern daß auch die zweite Erklärungsweise die richtige ist.

Zunächst mußte die Grundhypothese bestätigt werden, auf der diese zweite Erklärung beruht, nämlich die Annahme, daß die Dämpfung des Erregers viel schneller erfolgt als die des Resonators.

Ich habe oben (Seite 64) angegeben, wie Bjerknes die Dämpfung eines Resonators mißt.

Bjerknes erhielt als „logarithmisches Dekrement“ für einen Erreger den Wert 0,26, während er für zwei Resonatoren 0,002 und 0,034 erhielt. Das bedeutet: um die Amplitude auf den zehnten Teil ihres

Anfangswertes zu bringen, genügen bei dem Erreger 9 Schwingungen, während bei den beiden Resonatoren in dem einen Falle mehr als 60 und in dem anderen mehr als 1000 Schwingungen erforderlich sind.

Die Schwingung eines Erregers klingt also viel schneller ab als die eines Resonators.

6. Die Versuche von Strindberg.

Um die Bestätigung zu vervollständigen, bedurfte es noch des Nachweises, daß, wenn es durch irgendwelchen Kunstgriff möglich wird, die Dämpfung des Resonators stärker zu machen als die des Erregers, daß dann die Erscheinungen umgekehrt verlaufen, das heißt, daß dann der Abstand zweier aufeinanderfolgender Knoten nicht mehr vom Resonator, sondern nur noch vom Erreger abhängig ist.

Diesen Nachweis haben unabhängig voneinander der Franzose Décombe und der Schwede Nils Strindberg erbracht.

Ich kann diesen letzteren Namen nicht niederschreiben, ohne daran zu erinnern, daß sich Strindberg nicht damit begnügt hat, der Wissenschaft durch die Arbeit seines Geistes zu dienen, sondern daß er gleichfalls seinen Mut in ihren Dienst stellen wollte. Er hat Andrée auf seiner kühnen Luftreise nach dem Polargebiete begleitet und dabei den Tod gefunden.—

Bei der Ausführung des hier in Rede stehenden Versuches handelte es sich darum, die Dämpfung

des Erregers herabzusetzen und die des Resonators zu erhöhen.

Um die Dämpfung des Erregers herabzusetzen, mußte zunächst der durch den Funken verursachte Energieverlust unterdrückt werden. Das scheint unausführbar, denn ohne Unterbrecher ist die Auslösung des elektrischen Pendels nicht möglich und kann dieses Pendel nicht in Schwingung versetzt werden. Décombe hilft sich durch einen einfachen Kunstgriff aus dieser Schwierigkeit: Ein erster Erreger ist mit einer Funkenstrecke ausgerüstet; er wirkt durch Induktion auf einen zweiten ganz ähnlichen Erreger, der aber, da er durch die Wirkung des ersten in Bewegung gesetzt wird, der Funkenstrecke entbehren kann. Dieser zweite Erreger wird dieselbe Periode haben wie der erste, aber eine geringere Dämpfung. Er ruft seinerseits eine Störung in den Drähten hervor, und zwar ist die Anordnung die von Blondlot angegebene und in Fig. 4 dargestellte.

Andererseits kann man leicht den Widerstand des Resonators vergrößern; da nun dieser Widerstand einem Reibungswiderstand entspricht, so hat er den Erfolg, die Schwingungen des Resonators schneller zu dämpfen.

7. Die Versuche von Pérot und von Jones.

Es gibt noch andere, unmittelbare Beweismethoden: Wie wir gesehen haben, treten trotz der Dämpfung

noch stehende Wellen im eigentlichen Sinne auf, aber nur in der Nähe des Drahtendes. Die Untersuchung dieser stehenden Wellen kann uns über die Form der Störung Aufschluß geben, welche der Erreger hervorruft. Um indessen eine solche Untersuchung zu ermöglichen, darf man *keinen Resonator als Zwischenglied verwenden.* Wir haben ja gesehen, daß die Resonatoren sekundäre Wirkungen hervorrufen, welche für sich allein in großem Abstande vom Drahtende bestehen bleiben und sich dann in der Erscheinung der „multiplen Resonanz" kundgeben. Diese störenden Wirkungen müssen ausgeschaltet werden.

Dazu sind verschiedene Verfahren verwendet worden, die von dem Resonator unabhängig sind, und die wir weiter oben (Seite 60—64) besprochen haben.

Pérot hat den Funken ohne Resonator benutzt.

Jones hat ein thermisches Verfahren angewandt, bei dem er sich auf die Verwendung des Thermoelementes stützte.

Bjerknes bediente sich eines mechanischen Verfahrens.

Alle diese Versuche haben die Richtigkeit der zweiten Erklärungsweise bestätigt.

8. Die Versuche von Décombe.

Décombe hat diese Methoden für noch nicht unmittelbar genug erachtet. Er wollte die Störung

gerade in dem Augenblicke untersuchen, in dem sie vom Erreger hervorgerufen wird. Man könnte sich nämlich die Frage vorlegen, ob die Störung nicht eine Veränderung erleidet, wenn sie von dem Erreger auf die Drähte übergeht, oder während sie sich längs dieser Drähte fortpflanzt.

Décombe versuchte deshalb, den Funken des Erregers unter Zuhilfenahme eines rotierenden Spiegels zu photographieren. Das ist dasselbe, was Feddersen, jedoch mit Schwingungen von weit geringerer Frequenz, getan hat (vgl. Kapitel III). Bei den Hertzschen Schwingungen waren die Schwierigkeiten viel größer; mit dem Apparat von Hertz selbst (der 90000000 Schwingungen in der Sekunde lieferte) wären sie sogar unüberwindlich gewesen. Décombe mußte sich mit einem Erreger begnügen, der 5000000 Schwingungen in der Sekunde lieferte, während die Apparate von Feddersen deren nur 20000 bis 400000 gegeben hatten.

Die einzelnen Funken, welche den aufeinanderfolgenden Schwingungen entsprechen, bilden sich infolge der Bewegung des Spiegels in verschiedenen Punkten der lichtempfindlichen Platte ab. Die Bewegung des Spiegels muß sehr schnell sein, damit die einzelnen Lichtlinien, welche diesen Funken entsprechen, voneinander getrennt werden. Der Spiegel, den Décombe benutzte, machte 500 Umdrehungen in der Sekunde.

Damit die Platte trotz der kurzen Dauer der Belichtung einen Eindruck empfing, mußte Décombe alle verfügbaren Hilfsmittel im einzelnen bis zur Grenze ihrer Leistungsfähigkeit ausbilden und alle Chancen aufs äußerste ausnutzen.

Er mußte einen Erreger mit schwacher Dämpfung verwenden, den Funken in Öl übergehen lassen, weil er dabei kürzer und heller ist, und einen besonders kräftigen Entwickler anwenden. Der optische Apparat mußte so angeordnet werden, daß die Lichtlinien sehr schmal und dabei zugleich sehr intensiv wurden.

Alle diese Einzelheiten der Versuchsanordnung machen dem Erfindungsgeist des Forschers die allergrößte Ehre. Der Erfolg hat seine Bemühungen gekrönt, denn er hat Bilder erhalten, deren Untersuchung das Vorhandensein einer einfachen gedämpften Schwingung, in Übereinstimmung mit der zweiten Erklärungsweise, dargetan hat.

Allerdings hatte er nicht den Hertzschen Erreger benutzt, und sein Erreger liefert nur Schwingungen von zehnfach niedrigerer Frequenz; der Unterschied ist aber so gering, daß man von dem einen Fall auf den anderen schließen darf.

Nach Swyngedauw würde eine andere Ursache in zweiter Linie zur Entstehung der multiplen Resonanz beitragen. Wir haben gesehen, daß der Ohmsche Widerstand die Periode nicht merklich beeinflußt; sein Einfluß ist indessen nicht vollständig Null

und wirkt in dem Sinne, eine Verlängerung der Periode hervorzurufen. Nun ist der Widerstand des Funkens um so geringer, je heißer der Funke ist, und da der Funke beständig heißer wird, so muß die Periode von den ersten Schwingungen gegen die letzten hin ein wenig kleiner werden. Die Versuche von Décombe haben diese Auffassung nicht bestätigt; seither hat aber Tissot, gleichfalls unter Verwendung eines rotierenden Spiegels und unter Benutzung der Apparate für drahtlose Telegraphie, von denen weiter unten die Rede sein wird, eine Abnahme der Periode in dem von Swyngedauw vorausgesagten Sinne beobachtet. Es hat demnach den Anschein, als könne unter gewissen Verhältnissen die von dem genannten Gelehrten erwartete Erscheinung merklich werden.

Neuntes Kapitel.

Fortpflanzung in Luft.

1. Das experimentum crucis.

Alle bisher beschriebenen Versuche sind nicht imstande, zwischen der alten Theorie und der Maxwellschen zu entscheiden.

Beide Theorien lassen erwarten, daß die elektrischen Störungen sich längs eines leitenden Drahtes

mit einer Geschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen werden. Alle beide erklären den oszillatorischen Charakter der Entladung einer Leidener Flasche und demzufolge auch die in einem Erreger auftretenden Schwingungen. Nach allen beiden steht zu erwarten, daß diese Schwingungen in dem umgebenden Felde elektromotorische Induktionskräfte wachrufen und infolgedessen einen in dieses Feld gestellten Resonator in Schwingung versetzen werden.

Aber *nach der alten Theorie muß die Fortpflanzung der Induktionswirkungen augenblicklich erfolgen.* Wenn nämlich keine Verschiebungsströme vorkommen, wenn infolgedessen vom elektrischen Gesichtspunkte aus betrachtet in dem Dielektrikum, das den induzierenden Draht von dem induzierten trennt, *nichts* vor sich geht, so muß man notgedrungen annehmen, daß die Wirkung in dem induzierten Draht in demselben Augenblicke auftritt, wie die Ursache in dem induzierenden. In der Zwischenzeit, wenn es eine solche gäbe, würde nämlich die Ursache in dem induzierenden Drahte aufgehört haben, die Wirkung würde in dem induzierten Drahte noch nicht zustande gekommen sein, und in dem zwischen diesen beiden Drähten befindlichen Dielektrikum würde *nichts* stattfinden; es würde also an keiner Stelle etwas vorhanden sein. Die augenblickliche Fortpflanzung der Induktion ist demnach eine Folgerung, der die alte Theorie nicht ausweichen kann.

Nach der Maxwellschen Theorie muß sich die Induktion in der Luft mit derselben Geschwindigkeit fortpflanzen wie längs eines Drahtes, also mit der Lichtgeschwindigkeit.

Somit ergibt sich also das *experimentum crucis*: Wir müssen untersuchen, mit welcher Geschwindigkeit sich die magnetischen Störungen durch die Luft mittels Induktion fortpflanzen.

Ist diese Geschwindigkeit unendlich, so müssen wir an der alten Theorie festhalten; ist diese Geschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit, so müssen wir die Maxwellsche Theorie annehmen.

Welches Mittel haben wir nun für die Messung dieser Geschwindigkeit? Wir können diese Messung nicht direkt ausführen. Wir haben aber gesehen, daß, nach der Definition, die Wellenlänge gleich dem Wege ist, der während der Dauer einer Schwingung durchlaufen wird, und ich habe weiter gezeigt, wie man die Wellenlänge längs eines Drahtes messen kann.

Wenn die Wellenlänge in Luft dieselbe ist wie die Wellenlänge längs eines Drahtes, so heißt das, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Luft dieselbe ist wie längs eines Drahtes. Das heißt also, daß die Maxwellsche Theorie richtig ist.

Das Problem ist somit auf die Messung der Wellenlänge in Luft zurückgeführt.

Zur Ausführung dieser Messung kann man sich

desselben Verfahrens bedienen wie bei der Fortpflanzung längs eines Drahtes.

Wie wir sahen, ließ man die direkte längs des Drahtes verlaufende Welle mit der am Ende des Drahtes reflektierten Welle interferieren. Ebenso wird man die direkte durch die Luft gehende Welle mit der an einem ebenen Metallspiegel reflektierten Welle interferieren lassen. Diesen Spiegel wird man so anordnen, daß ihn die direkte Strahlung senkrecht trifft, und daß folglich die reflektierte Welle in entgegengesetzter Richtung läuft wie die direkte.

Unter diesen Versuchsbedingungen würde man stehende Wellen im eigentlichen Sinne erhalten, wenn die Schwingung des Erregers keine Dämpfung hätte. Infolge dieser Dämpfung aber, und aus denselben Gründen, die ich bereits im siebenten Kapitel auseinandergesetzt habe, wird die Erscheinung der multiplen Resonanz auftreten. Ich brauche hier die oben gegebenen Ausführungen (Seite 97—98) nicht wiederholen. Es wird alles genau in derselben Weise verlaufen.

Wenn man einen Resonator zwischen dem Erreger und dem Spiegel hin und her bewegt, so beobachtet man eine Reihe von Knoten und Bäuchen; die Knoten werden die Punkte sein, in denen der Resonator nicht auf den Erreger anspricht, und die Bäuche werden die Punkte sein, in denen die Intensität der Erscheinung ihren Höchstwert besitzt.

Der Abstand zweier benachbarter Knoten ist gleich der halben Wellenlänge *des Resonators* in Luft, gerade so, wie für den Fall der Fortpflanzung längs eines Drahtes der Knotenabstand gleich der halben Wellenlänge *des Resonators* längs eines Drahtes ist. Wenn also der Knotenabstand in Luft gleich dem Knotenabstand längs eines Drahtes ist, so heißt das so viel, daß die Wellenlänge in Luft dieselbe ist wie die Wellenlänge längs eines Drahtes, und das heißt, daß die Maxwellsche Theorie richtig ist.

2. Die Karlsruher Versuche.

Dies ist das *experimentum crucis*, welches Hertz zum ersten Male in Karlsruhe ausgeführt hat. Er erhielt zunächst nicht das erwartete Ergebnis.

Längs eines Drahtes lieferte sein Resonator einen Knotenabstand von 3 m; in Luft schien er einen Knotenabstand von 4,50 m, also eine Wellenlänge von 9 m zu ergeben. Dieses Versuchsergebnis erschien ohne Zweifel vernichtend für die alte elektrodynamische Theorie, welche eine unendliche Wellenlänge verlangt hätte; es erschien aber gleichfalls vernichtend für die Maxwellsche Theorie, die eine Wellenlänge von 6 m verlangt hätte.

Dieser Mißerfolg ist nie recht aufgeklärt worden. Wahrscheinlich war der Spiegel zu klein im Verhältnis zur Wellenlänge, und die Beugung störte daher die Erscheinung. Vielleicht übten auch

BIBL. UNIVERS. LIPS.

die Reflexionen der Wellen an den Wänden des Saales oder an den gußeisernen Säulen, welche diesen Saal in drei Teile teilten, eine störende Wirkung aus.

Wie dem auch sei, jedenfalls führten kleinere Erreger zu anderen Ergebnissen und zeigten in Luft und längs eines Drahtes denselben Knotenabstand; ohne Zweifel war die Wellenlänge, die ja jetzt geringer war, nicht mehr zu groß im Verhältnis zu den Abmessungen des Spiegels.

3. Die Genfer Versuche.

Die Frage war indessen nicht entschieden, und die auftretende Krankheit gestattete Hertz nicht, seine Versuche wieder aufzunehmen. Sarasin und de la Rive nahmen sie nunmehr auf, und zwar unter hinreichenden Vorsichtsmaßregeln, um alle Fehlerquellen auszuschließen.

Ihr Spiegel hatte eine Größe von 8 m bei 16 m, und sie arbeiteten in einem sehr großen und ganz freien Saale. Ihre Ergebnisse waren mit dem Resonator von 75 cm (der dieselbe Wellenlänge hatte wie der große Erreger von Hertz) ebenso klar wie mit den kleineren Resonatoren. Diese Ergebnisse müssen daher als entscheidend angesehen werden.

Im Einklang mit der Maxwellschen Theorie ist der Knotenabstand in Luft und längs eines Drahtes derselbe.

4. Verwendung des kleinen Erregers.

Der Versuch läßt sich leichter mit dem kleinen Erreger von Hertz wiederholen, der, wie bereits oben (Seite 51) erwähnt, aus einer Art kurzer Metallstange besteht, die in der Mitte eine Unterbrechungsstelle aufweist.

Bekanntlich benutzt man parabolische Spiegel, um das von einer Lichtquelle von kleinen Abmessungen ausgehende Licht zu einem parallelen Strahlenbündel zusammenzufassen. Man nennt diese Vorrichtung einen parabolischen Projektor oder Reflektor.

Ungefähr dasselbe kann man mit den Strahlungen machen, die ein Erreger hervorbringt. Nur sind hier die Abmessungen des Erregers denen des Spiegels vergleichbar, so daß der Erreger mehr einer leuchtenden Linie als einem leuchtenden Punkte vergleichbar ist.

Statt daher dem Spiegel die Gestalt eines Rotationsparaboloides zu geben und die Strahlungsquelle in seinem Brennpunkt anzuordnen, gibt man ihm hier die Gestalt eines parabolischen Zylinders und ordnet den Erreger längs seiner Brennlinie an. Auf diese Weise erhält man ein paralleles Bündel von Strahlen elektrischer Kraft.

Ebenso kann man den Resonator, der dem Erreger vollkommen gleich ist, längs der Brennlinie

eines zweiten Parabolspiegels anordnen. Dieser zweite Spiegel vereinigt die parallelen Strahlen auf den Resonator.

Bei den gleich zu beschreibenden Interferenzversuchen empfiehlt es sich allerdings, diesen zweiten Spiegel fortzulassen, weil er als Schirm wirken und den Resonator gegen die reflektierte Welle abschirmen würde.

5. Natur der Strahlungen.

Das Feld, welches einen Erreger umgibt, wird von elektromagnetischen Strahlungen durchfurcht. Die Theorie gestattet, die Gesetze ihrer Verteilung vorauszusagen, und die Versuchsergebnisse haben diese Voraussagen, wenigstens in ihren allgemeinen Zügen, die allein den Hilfsmitteln unserer Forschung zugänglich sind, bestätigt.

Diese Gesetze sind ziemlich verwickelt, und ich will, um ihre Darstellung etwas einfacher zu gestalten, nur solche Punkte des Feldes betrachten, die von dem Erreger sehr weit entfernt sind.

Wir wollen also eine Kugel von sehr großem Halbmesser betrachten, welche die Mitte des Erregers zum Mittelpunkt haben möge. In jedem Punkte dieser Kugel haben wir eine elektromotorische Kraft, die sich bei jeder Schwingung ändert, und zwar wird sie zweimal Null und wechselt zweimal ihr Vorzeichen, behält aber dieselbe Richtung

bei; wir haben gleichfalls eine magnetische Kraft, welche analoge Änderungen erfährt.

Welches wird die Richtung dieser beiden Schwingungen sein, von denen die eine eine elektrische, die andere eine magnetische ist?

Wir wollen auf der Kugel ein System von Meridianen und Parallelkreisen ziehen, wie auf einem Erdglobus, dessen beide Pole die Punkte sein würden, an denen die Kugeloberfläche von der verlängerten Achse des Erregers getroffen wird.

Die elektrische Kraft wird tangential zum Meridian, die magnetische Kraft tangential zum Parallelkreise verlaufen. Die beiden Schwingungen stehen also aufeinander senkrecht; sie stehen alle beide senkrecht auf dem Kugelhalbmesser, das heißt auf der Fortpflanzungsrichtung; diese Fortpflanzungsrichtung entspricht dem, was in der Optik die Richtung des Lichtstrahles ist. *Diese beiden Schwingungen sind also Transversalschwingungen wie die Lichtschwingungen.*

Die Amplitude dieser Schwingungen ändert sich umgekehrt wie der Abstand vom Erreger: Die Intensität ändert sich also umgekehrt wie das Quadrat dieses Abstandes.

Die Schwingung hat, wie wir eben gesehen haben, eine konstante Richtung, sie läßt sich also mit den Schwingungen des polarisierten Lichtes vergleichen, und nicht mit denen des natürlichen Lichtes, dessen

Richtung sich unaufhörlich ändert, während sie stets senkrecht zum Lichtstrahl bleibt.

Noch eine Frage drängt sich auf: Was entspricht dem Begriff der Polarisationsebene in der Optik? Die Ebene senkrecht zur elektrischen Schwingung? Oder die Ebene senkrecht zur magnetischen Schwingung? Wir werden im elften Kapitel sehen, wie man festzustellen vermocht hat, daß die erste dieser beiden Annahmen die richtige ist.

Es besteht noch ein anderer Unterschied gegenüber dem von einer gewöhnlichen Lichtquelle ausgesandten Licht: Die Intensität ist nicht nach allen Richtungen dieselbe; sie ist am größten am Äquator, Null an den Polen (wenn wir wieder auf das Netz von Meridianen und Parallelkreisen zurückgreifen, das wir auf unserer Kugel angenommen hatten).

Von diesen Unterschieden abgesehen, ist die Art der Fortpflanzung einer elektromagnetischen Störung durch die Luft dieselbe wie die des Lichtes. Bei der Fortpflanzung längs eines Drahtes hatten wir auch noch die Verschiebungsströme, aber diese Ströme waren nur in der Luft in unmittelbarer Nachbarschaft des Drahtes merklich. Statt sich nach allen Richtungen hin zu zerstreuen, pflanzte sich die Störung nach einer einzigen Richtung hin fort; die Folge davon war, daß ihre Intensität erhalten blieb und nicht nach dem Gesetze vom Quadrate der Entfernungen abnahm.

Zehntes Kapitel.

Fortpflanzung in Dielektriken.

1. Die Maxwellsche Beziehung.

Wenn man in einem Kondensator die isolierende Luftschicht durch eine aus einem anderen isolierenden Stoffe hergestellte Schicht ersetzt, so beobachtet man, daß dadurch die Kapazität des Kondensators mit einem Koeffizienten multipliziert wird, den man als die Dielektrizitätskonstante oder das Induktionsvermögen des betreffenden Stoffes bezeichnet. Die Theorie verlangt, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Wellen in einem Dielektrikum im umgekehrten Verhältnis zur Quadratwurzel aus dem Induktionsvermögen dieses Dielektrikums stehe.

Nun steht andererseits die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in einem durchsichtigen Medium im umgekehrten Verhältnis zum Brechungsindex. Das Induktionsvermögen müßte also gleich dem Quadrate des Brechungsindex sein. Das ist die theoretische Beziehung, die Maxwell aufgestellt hat.

Sie findet sich, außer beim Schwefel, schlecht bestätigt. Das läßt sich auf zweierlei Weise erklären: Entweder ist der Brechungsindex für sehr lange Wellen, wie es die Hertzschen Wellen sind, nicht derselbe wie der optische Brechungsindex; das würde keineswegs überraschend sein, wissen wir doch, daß

die verschiedenen Strahlen ungleich brechbar sind, und daß der Brechungsindex des Rot von dem des Violett verschieden ist.

Oder aber das Quadrat des elektrischen Brechungsexponenten ist an sich verschieden von dem Induktionsvermögen, wie wir es nach statischen Methoden in einem nicht veränderlichen Felde messen; das würde sich aus verschiedenen sekundären Einflüssen, wie den Ladungsrückständen, erklären.

Es ergibt sich daraus die Notwendigkeit, das Induktionsvermögen nach zweierlei Methoden zu messen: einerseits nach *dynamischen Methoden*, die sich auf die Verwendung elektrischer Schwingungen gründen, und die uns den elektrischen Brechungsindex liefern werden; und andererseits nach *statischen Methoden* in einem konstanten Felde.

2. Dynamische Methoden.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist dieselbe in Luft und längs eines in Luft ausgespannten metallischen Drahtes. Ebenso muß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit durch ein Dielektrikum der Fortpflanzungsgeschwindigkeit längs eines in ein Dielektrikum eingebetteten Drahtes gleich sein. Es wird somit genügen, wenn man diese letztere mißt.

Wie wir gesehen haben, mißt man die Wellenlänge einer elektrischen Schwingung in der Weise, daß man den Knotenabstand an einem Drahte mit

Hilfe eines Resonators aufsucht (vgl. Seite 93—94). Wenn der Draht in ein Dielektrikum eingebettet ist, so ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit verringert; da die Periode dieselbe geblieben ist, so haben die Wellenlänge und der Knotenabstand in demselben Verhältnis abgenommen; dieses Verhältnis ist daher leicht zu messen, und es ist der reziproke Wert des elektrischen Brechungsindex.

Wir wollen dagegen jetzt annehmen, der Resonator, dessen wir uns für die Untersuchung bedienen, bestehe aus einem Kondensator, dessen Belegungen durch einen Draht verbunden sind (Blondlotscher Kondensator). Bringen wir nun zwischen die beiden Belegungen eine Schicht aus einem isolierenden Stoffe, so wird die Kapazität des Resonators mit dem Induktionsvermögen multipliziert; die Periode der Schwingung, auf welche der Resonator anspricht, ist daher vergrößert worden, und folglich der Knotenabstand ebenfalls.

Wenn der Draht, an dem entlang sich die elektrische Schwingung fortpflanzt, und der Resonator mit seinem Kondensator in ein und dasselbe Dielektrikum eingebettet werden, so müssen sich die beiden Wirkungen genau aufheben, und der Knotenabstand darf sich nicht ändern. Das wird auch tatsächlich beobachtet.

Diese Methoden zur Messung des elektrischen Brechungsindex haben ihr optisches Analogon in

der Messung mit dem Interferenzrefraktometer. Man kann aber auch die elektrischen Strahlen durch ein Prisma aus einem Dielektrikum brechen lassen, oder noch besser die totale Reflexion benutzen.

3. Statische Methoden.

Um ein Induktionsvermögen in einem konstanten Felde zu messen, muß man zwei Kapazitäten miteinander vergleichen können. Zu diesem Zwecke kann man folgendermaßen verfahren:

1. Man kann einen Kondensator durch einen Draht entladen und mit Hilfe eines *ballistischen Galvanometers* die durchfließende Elektrizitätsmenge messen.
2. Man kann einen Kondensator zu zahlreichen Malen in einer Sekunde laden und entladen und den dabei entstehenden intermittierenden Strom mit einem kontinuierlichen Strom von gegebenem Widerstand vergleichen. *(Methode von Maxwell.)*
3. Man kann zwei Kondensatoren hintereinander schalten und die Gleichheit zwischen ihren Kapazitäten nachweisen, indem man zeigt, daß das Potential der mittleren Belegung das arithmetische Mittel zwischen den Potentialen der äußeren Belegungen ist. *(Methode von Gordon.)*
4. Man kann die *Anziehung* messen, welche zwei

in ein Dielektrikum eingetauchte elektrisierte Kugeln aufeinander ausüben.

5. Man kann zwei Elektrometer gegeneinander schalten und je die entsprechenden Quadrantenpaare und die Nadeln metallisch miteinander verbinden; dabei würde dann das eine Elektrometer in ein Dielektrikum, das andere in Luft eingebettet sein. *(Differentialelektrometer.)*
6. Man kann die Ablenkung der Kraftlinien untersuchen, welche in einem elektrischen Felde durch die Einbringung eines dielektrischen Prismas herbeigeführt wird. *(Pérots Methode der Äquipotentialflächen.)*

4. Ergebnisse.

Alle diese Methoden liefern Ergebnisse, die untereinander sehr schlecht übereinstimmen.

An *Harz* sind die nachstehenden Werte für das Induktionsvermögen, das wir mit ε bezeichnen wollen, gefunden worden:

Als Quadrat des optischen Brechungsindex	2
nach der Methode der Äquipotentialflächen	2,1
mit Hertzschen Schwingungen	2,12
mit dem ballistischen Galvanometer	2,03
nach einer anderen statischen Methode	2,88
nach der Anziehungsmethode	5,44

Bei Alkohol, Wasser und Eis werden wir noch erheblicheren Unstimmigkeiten begegnen.

Alkohol: 1. Die statischen Methoden haben für $\sqrt{\varepsilon}$ Zahlenwerte ergeben, die in der Nähe von 4,9 liegen, also sehr stark von dem optischen Brechungsindex abweichen.

2. Indessen hat Stchegtioef nach der Methode von Gordon mit elektrischen Schwingungen, die von einem Induktorium erzeugt wurden, einen Wert für $\sqrt{\varepsilon}$ gefunden, der dem optischen Brechungsindex nahekommt.

3. Die Methoden, die sich auf die Verwendung Hertzscher Schwingungen gründen, haben einen Wert in der Nähe von 4,9 ergeben.

Wasser: Gouy fand nach der Anziehungsmethode: $\varepsilon = 80$.

Der Wert von ε schwankt übrigens, je nach den Verunreinigungen, welche in dem Wasser enthalten sind und es mehr oder minder leitend machen; 80 ist der Wert, dem ε zustrebt, wenn die Leitfähigkeit des Wassers sich dem Werte 0 nähert.

Cohn hat ε in der Weise gemessen, daß er die Wellenlänge an einem in Wasser tauchenden Drahte aufsuchte. Er fand, daß ε von der Leitfähigkeit des Wassers und von der Temperatur abhängig ist. Die von ihm gefundenen Zahlenwerte bewegen sich in der Nähe des von Gouy angegebenen.

Nur ein einziger Experimentator hat für ε einen Zahlenwert gefunden, der in der Nähe des Quadrates aus dem optischen Brechungsindex, $\varepsilon = 1{,}75$, liegt.

Eis. Nach einer statischen Methode ergab sich

$$\varepsilon = 78,$$

ein Wert, der dem von Gouy für Wasser gefundenen nahekommt.

Blondlot fand dagegen unter Anwendung Hertz scher Schwingungen:

$$\varepsilon = 2{,}5,$$

und Pérot erhielt nach derselben Methode einen dem vorstehenden ähnlichen Wert.

Wir sehen hier also eine gewaltige Verschiedenheit zwischen dem von Blondlot und von Pérot einerseits gefundenen Zahlenwert und dem Werte 78 andererseits. Vielleicht war im letzteren Falle im Eis flüssiges Wasser eingeschlossen.

5. Leiter.

Die für das Licht durchsichtigen Körper sind im allgemeinen schlechte Leiter; im Gegensatz dazu sind die Metalle sehr gute Leiter und sehr lichtundurchlässig. Darin liegt durchaus nichts Paradoxes. Die Dielektrika setzen elektrischen Wellen (wie wir dies im zweiten Kapitel gesehen haben) einen elastischen Widerstand entgegen, der die lebendige Kraft zurückgibt, die ihnen mitgeteilt wird; sie lassen also die Schwingungen hindurch. Die Leiter hingegen leisten einen viskosen Widerstand, der die lebendige Kraft vernichtet, um sie in Wärme umzuwandeln; sie absorbieren also die elektrischen Wellen und das Licht.

In der Tat hat es sich herausgestellt, daß die Metalle die elektrischen Schwingungen wie ein Schirm aufhalten; sie bilden nur einen unvollkommenen Schirm für die Schwingungen von sehr langer Periode, aber ihre Undurchlässigkeit ist bereits für die Hertzschen Schwingungen nahezu vollkommen. Die weiter oben angeführten Versuche von Bjerknes (Seite 79—80) zeigen, daß diese Strahlungen in ein Metall nicht tiefer als ein hundertstel Millimeter eindringen können.

Indessen hat Bose, dessen überaus empfindlichen Apparat wir weiter unten beschreiben wollen, zu beobachten gemeint, daß diese Strahlungen die Metalle durchdringen. Branly hat vor kurzem gezeigt, daß metallische Hüllen selbst für die sehr schnellen Schwingungen, wie sie Bose erhalten hat, undurchdringlich sind, *vorausgesetzt, daß diese Hüllen vollkommen geschlossen sind.* Schon die allerkleinste Öffnung genügt, um Beugungserscheinungen auftreten zu lassen, durch die dann der sehr empfindliche Bosesche Empfänger beeinflußt wird.

Die Empfindlichkeit des Kohärers ist also so groß, daß er gebeugte Wellen *in allen Teilen des geometrischen Schattens,* und nicht nur an den Rändern dieses Schattens, nachweist.

Man muß sich dies gegenwärtig halten, um zu verstehen, wie bei der drahtlosen Telegraphie die Hertzschen Wellen Hindernisse zu umgehen vermögen, die uns ungeheuer erscheinen.

6. Elektrolyte.

Jeder Leiter ist also undurchsichtig, jeder Isolator ist durchsichtig. Von dieser Regel gibt es scheinbare Ausnahmen.

Gewisse Körper, wie Ebonit, sind Isolatoren, ohne durchsichtig zu sein. Wir stellen aber fest, daß sie zwar für das sichtbare Licht undurchsichtig sind, die Hertzschen Wellen aber hindurchlassen.

Das kann uns ebensowenig wunder nehmen, wie wenn wir sehen, daß das rote Licht durch rotes Glas hindurchgeht, welches das grüne Licht zurückhält. Übrigens müssen diese Körper, die für die elektrischen Wellen von langer Periode durchlässig sind, sich naturgemäß in einem statischen Felde, wo die Periode als unendlich angesehen werden muß, wie Dielektrika verhalten.

Andererseits sind gewisse Flüssigkeiten, wie Salzwasser oder angesäuertes Wasser, Leiter der Elektrizität, aber für das Licht durchlässig. Diese Flüssigkeiten, welche durch den Strom zersetzt werden, und die man Elektrolyte nennt, haben nämlich eine Leitfähigkeit, die von jener der Metalle ganz verschieden ist.

Die Moleküle des Elektrolyten werden in „Ionen“ zerlegt. Die Elektrizität wird von einer Elektrode zur anderen von diesen durch die Flüssigkeit hindurch wandernden Ionen *transportiert*. Die elektrische Energie wird also nicht in Wärme verwandelt,

wie in den Metallen, sondern in chemische Energie. Zweifellos hat dieser an die sehr langsame Bewegung der Ionen gebundene Vorgang nicht Zeit einzutreten, wenn die Schwingung so schnell erfolgt wie die des Lichtes. Tatsächlich sind die Elektrolyte für die Hertzschen Wellen schon ziemlich durchlässig.

Elftes Kapitel.

Erzeugung sehr schneller und sehr langsamer Schwingungen.

1. Sehr kurze Wellen.

Man erhält mit dem Blondlotschen Erreger Wellenlängen von 30 m, mit dem großen Hertzschen Erreger solche von 6 m, und mit dem kleinen Hertzschen Erreger solche von 60 cm. Mit anderen Worten, man erhält:

mit dem Blondlotschen Erreger . . . 10000000,
mit dem großen Hertzschen Erreger . 50000000,
mit dem kleinen Hertzschen Erreger . 500000000
Schwingungen in der Sekunde.

Man ist hierbei nicht stehen geblieben: Der geistvolle italienische Physiker Righi, und nach ihm ein junger indischer Professor, Jagadis Bose, haben Apparate konstruiert, die viel weiter zu gehen gestatten.

Theoretisch brauchte man zu diesem Zwecke nur die Abmessungen des Apparates zu verkleinern. Aber damit schwächte man zugleich die Schwingungen, und man mußte nun Empfänger ersinnen, die empfindlich genug wären, um diese Schwingungen nachzuweisen.

2. Der Righische Erreger.

Der Erreger von Righi besteht aus zwei kupfernen Kugeln *A* und *B* (Figur 5), die in der Mitte zweier Scheiben aus Holz, Glas oder Ebonit befestigt sind. Diese beiden Scheiben bilden die beiden Grundflächen einer Art zylindrischen Gefäßes, dessen Dicke viel größer ist als seine Höhe, und dessen Seitenwände biegsam sind. Die eine Scheibe ist mit einem Loch versehen, durch welches man das Gefäß mit Vaselinöl füllen kann.

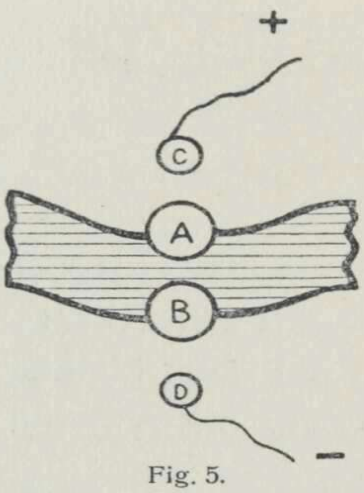

Fig. 5.

Verschiedene Vorrichtungen ermöglichen, dank der Biegsamkeit der Seitenwände des Gefäßes, den Abstand der beiden Kugeln zu verändern und zu regulieren.

Der Funke springt zwischen den beiden Kugeln über wie beim Lodgeschen Erreger; die Wellenlänge ist aber sehr klein, dank der kleinen Abmessungen dieser Kugeln.

Der Funke geht in Öl über; die Vorteile dieser Anordnung haben wir bereits früher erörtert. Vermöge dieses Kunstgriffes konnten die Schwingungen trotz der geringen Größe des Apparates eine ausreichende Stärke behalten; wir haben ja gesehen, daß durch die Anwendung von Öl die Schwingungen verstärkt und gleichzeitig die Funken regelmäßiger werden.

Um den Erreger anzulassen, bedient sich Righi nicht eines Rühmkorff-Induktors, sondern einer Holtzschen Elektrisiermaschine, wie sie übrigens bei den Hertzschen Erregern ebenfalls zur Anwendung gelangt ist.

Es muß bemerkt werden, daß die beiden Kugeln *A* und *B* nicht unmittelbar mit den beiden Polen der Elektrisiermaschine verbunden werden; diese beiden Pole stehen vielmehr mit zwei weiteren Kugeln, *C* und *D*, in metallischer Verbindung. Die Kugel *C* ist in kurzem Abstand von der Kugel *A* und die Kugel *D* ganz dicht vor der Kugel *B* angeordnet. Wir werden also drei Funken übergehen sehen, einen zwischen *C* und *A*, einen zweiten zwischen *A* und *B*, und einen dritten zwischen *B* und *D*. Der erste und der dritte Funke gehen in Luft über, der zweite in Öl.

Dieser zweite Funke nun hat oszillatorischen Charakter. Die beiden übrigen, die in Luft überschlagen, dienen nur dazu, die beiden Kugeln *A* und *B*

aufzuladen. Wenn sie diesen beiden letztgenannten Kugeln hinreichende Ladungen erteilt haben, so springt der Funke *AB* in Öl über, und die Schwingungen beginnen.

Es ist notwendig, die Länge dieser drei Funken zu regulieren; Righi gab dem mittleren Funken eine Länge von ungefähr 1 mm und den beiden äußeren Funken eine solche von 2 cm. Der Durchmesser der beiden Kugeln *A* und *B* betrug ungefähr 4 cm. Die erhaltene Wellenlänge belief sich auf etwa 10 cm, das entspricht ungefähr 3000000000 Schwingungen in der Sekunde.

Mit Kugeln von 8 mm Durchmesser erhielt Righi noch viermal schnellere Schwingungen.

3. Resonatoren.

Trotz der Vervollkommnungen, die Righi bei der Konstruktion seines Erregers eingeführt hat, sind die Wirkungen noch sehr schwach, und es sind zu ihrem Nachweis Resonatoren von ganz besonderer Empfindlichkeit erforderlich.

Der italienische Forscher hat sich bei der Konstruktion seines Resonators von zwei Erwägungen leiten lassen: Zunächst sind die Funken bei einer und derselben Potentialdifferenz viel länger, wenn sie an der Oberfläche eines Isolators überspringen, als wenn sie frei in der Luft übergehen. Zweitens kann man, da die elektromagnetischen Wirkungen sich nur

an der Oberfläche der Metalle fortpflanzen, ohne Nachteile die Dicke des metallischen Teiles der Resonatoren herabsetzen.

Righi schlägt deshalb auf elektrolytischem Wege eine dünne Silberschicht auf einer Glasplatte nieder; diese Schicht hat die Gestalt eines Rechtecks, das erheblich länger als breit ist. In der Mitte dieses Rechtecks zerteilt er diese Silberschicht durch einen Schnitt mit einem Diamanten; dadurch wird die Versilberung durch eine Furche unterbrochen, deren Breite einige Tausendstel Millimeter beträgt. Durch diese Furche geht der Funke über. Wie man sieht, wird er schon bei sehr geringen Potentialdifferenzen überspringen, weil die zu überschreitende Strecke sehr klein ist, und weil der Funke an der Oberfläche des Glases übergeht.

Die Funken werden mit Hilfe eines kleinen Mikroskops beobachtet.

Der Righische Resonator arbeitet nach der Art der geradlinigen Hertzschen Resonatoren.

Die von dem Erreger ausgehenden Strahlen elektrischer Kraft werden durch einen Spiegel parallel gemacht, der die Gestalt eines parabolischen Zylinders hat; ein zweiter Spiegel von derselben Gestalt vereinigt sie dann auf den Resonator.

Dieser sehr empfindliche Apparat gestattet ein bequemes Messen. Man kann nämlich den Resonator drehen: Die Wirkung ist ein Maximum, wenn der

Resonator parallel zum Erreger steht, das heißt parallel zu der Geraden, welche die Mittelpunkte der beiden Kugeln *A* und *B* miteinander verbindet. Sie ist Null, wenn der Resonator senkrecht zum Erreger steht. Bei den übrigen Stellungen nimmt sie Zwischenwerte an. Man sieht nun, welche Stellung man dem Resonator geben muß, damit die Funken anfangen, bemerkbar zu werden.

4. Der Bosesche Erreger.

Jagadis Chunder Bose hat noch schnellere Schwingungen erhalten. Sein Erreger besteht aus drei Metallkugeln, *A, B* und *C*. Die beiden Kugeln *A* und *C* sind mit den Polen eines Rühmkorff-Induktors verbunden, die mittlere Kugel, *B*, ist isoliert. Es gehen zwei Funken über, nämlich einer zwischen *A* und *B* und der andere zwischen *B* und *C*. Wir haben hier wiederum eine Form des Lodgeschen Erregers.

Die Funken gehen in Luft über. Damit sie trotzdem lange genug ihren oszillatorischen Charakter beibehalten, dürfen sich die Elektroden nicht verändern. Bose verwendet deshalb nicht Kupferkugeln, sondern Platinkugeln.

Statt das Induktorium mit einem Hammerunterbrecher zu betreiben, verwendet Bose einen von Hand betätigten Unterbrecher. Jeder Handgriff liefert ihm also eine einzige Reihe abnehmender Schwin-

gungen und nicht eine ununterbrochene Folge von Funken, durch welche die Elektroden rasch abgenutzt werden würden.

Dank dieser Vorsichtsmaßregeln behalten die Funken ihren oszillatorischen Charakter, und man braucht die Elektroden nicht so häufig reinigen und polieren.

Die Wirkungen sind schwach, aber Bose rechnet für ihren Nachweis einzig und allein auf die Empfindlichkeit seines Empfängers. Er legt übrigens weniger Wert auf die Intensität der Wirkung als auf ihre Regelmäßigkeit und ihre Konstanz, Eigenschaften, die allein imstande sind, Messungen zu ermöglichen. Gar zu starke Schwingungen wären in seinen Augen sogar ein Nachteil; er fürchtet nämlich, daß dann durch Reflexion und Beugung sekundäre Strahlungen wachgerufen werden würden, die imstande wären, ihrerseits auf den Empfänger zu wirken und die Beobachtungen zu stören.

Batterie und Induktor sind in eine doppelte Metallumhüllung eingeschlossen, die fast vollkommen geschlossen ist; sie können somit nach außen hin keinerlei störenden Einfluß ausüben. Auf dem Kasten ist das Rohr angebracht, welches den Erreger enthält. Die von diesem Erreger ausgehenden Strahlungen werden mittels einer Zylinderlinse aus Schwefel oder aus Ebonit parallel gemacht.

Mit dieser Anordnung erhält man Wellenlängen

von 6 mm, entsprechend einer Schwingungszahl von

50000000000

in der Sekunde. 10000 mal schnellere Schwingungen würden hinreichen, um einen Eindruck auf die Netzhaut zu machen (sie würden dem orangefarbenen Spektralgebiet entsprechen); wir befinden uns, wie Bose sagt, dreizehn Oktaven vom sichtbaren Lichte entfernt. Es ist gelungen, ein paralleles Bündel elektrischer Strahlen herzustellen, dessen Querschnitt ein bis zwei Quadratzentimeter betrug.

5. Der Bosesche Empfänger.

Der Bosesche Empfänger beruht auf dem Prinzip des Branlyschen Radiokonduktors. Dieser Radiokonduktor ist ein Instrument von wunderbarer Empfindlichkeit, aber er ist in seinen Angaben ein wenig launenhaft. Von Zeit zu Zeit wird er so außerordentlich empfindlich, daß das Galvanometer ohne ersichtliche Ursache abgelenkt wird; zuweilen verschwindet auch seine Empfindlichkeit plötzlich in dem Augenblick, wo er wunderbar zu arbeiten scheint.

Zweifellos gelangen gewisse Teilchen in zu innige Berührung, oder die Berührungsflächen haben durch Ermüdung infolge langandauernder Einwirkung ihre Empfindlichkeit verloren.

Bose hat deshalb den ursprünglichen Radiokonduktor umgestaltet: Feine Stahldrähte werden zu Spiralen aufgewickelt. In einen Ebonitklotz wird eine

schmale Nute gegraben, und diese wird mit Spiralen angefüllt, die dann darin eine einfache Schicht bilden. Jede dieser Spiralen berührt die folgende in einem ganz bestimmten Punkte, und es sind somit an tausend Berührungsstellen vorhanden. Die Spiralen sind zwischen zwei Bronzestücken angeordnet, von denen das eine festsitzt, während das andere hin und her gleiten kann. Diese Bronzestücke stehen in metallischer Verbindung mit einer Batterie.

Der Strom dieser Batterie gelangt also in die oberste Spirale, geht durch alle Spiralen, indem er von einer zur andern durch die Berührungsstellen übergeht, und tritt aus der untersten Spirale wieder aus.

Der Widerstand, den diese Berührungsstellen dem Strome entgegensetzen, nimmt jedesmal ab, sooft elektromagnetische Strahlungen auf den Empfänger auffallen.

Der an den einzelnen Berührungsstellen wirkende Druck wird durch eine Schraube reguliert, die auf die erste Spirale drückt; dieser Druck ist gleichförmig, weil jede Spirale ihn auf die folgende überträgt.

Alle Berührungspunkte liegen auf einer Geraden, und auf diese können die Strahlungen mit Hilfe einer Zylinderlinse konzentriert werden.

Wenn diese Strahlungen wirken, so nimmt der Gesamtwiderstand des Apparates ab, der hindurchfließende Strom wird stärker, und diese Intensitätsschwankungen werden von einem Galvanometer angezeigt.

Die Empfindlichkeit dieses Apparates ist hervorragend; er spricht auf alle Strahlungen im Intervall einer Oktave an. Man macht ihn für Strahlen verschiedener Art dadurch empfindlich, daß man die elektromotorische Kraft verändert, welche den durch den Empfänger fließenden Strom hervorbringt.

Der Apparat ist in eine Metallhülle eingeschlossen, die nur eine enge lineare Öffnung aufweist. Er ist also gegen alle Strahlungen geschützt mit Ausnahme derer, die auf diese Öffnung konzentriert werden.

6. Tesla-Apparate.

Die soeben besprochenen Wellen sind viel kürzer als die von den gewöhnlichen Hertzschen Errregern erzeugten. Man hat auch viel längere dargestellt, und wir werden weiter unten sehen, daß gerade diese langen Wellen in der Telegraphie ohne Draht Verwendung finden.

Andererseits hat Tesla in Amerika eine ganze Reihe von Erfindungen zur Erzeugung von Strömen sehr hoher Frequenz gemacht. Nachdem er verschiedene mechanische Anordnungen versucht hatte, ist er bei einem Apparate stehen geblieben, der aus einem richtigen Hertzschen Erreger im Verein mit einem Resonator besteht; nur ist die Kapazität des Erregers groß und daher die Wellenlänge erheblich größer, als sie Hertz erhalten hatte.

Auf der anderen Seite ist die Intensität der Wirkungen größer, einmal, weil die größere Kapazität des Erregers gestattet, mehr Elektrizität in ihm anzusammeln, ehe der Funke überschlägt; zweitens, weil das im Resonator erreichte Potential beträchtlich größer ist als das im Erreger. Der Grund hierfür ist folgender: Der Resonator ist nahe bei dem Erreger angeordnet und besteht aus einem schraubenförmig aufgewundenen Draht. Jeder Schraubengang ist der Sitz einer induzierten elektromotorischen Kraft, die von dem Felde herrührt, das der Erreger hervorruft; alle diese elektromotorischen Kräfte setzen sich nun zusammen. Der Apparat ist im Grunde genommen ein Transformator, dessen Primäre der Erreger, und dessen Sekundäre der Resonator bildet. Bekanntlich verhält sich in einem Transformator das Potential der Sekundären zu dem der Primären wie die Windungszahlen. (Das würde wenigstens gelten, wenn keine „magnetischen Verluste“ vorhanden wären; diese sind hier beträchtlich.) Andererseits verhalten sich die Stromstärken umgekehrt wie die Potentiale, so daß man an Stromstärke verliert, was man an Potential gewinnt. (Das muß übrigens so sein, denn sonst hätten wir das Perpetuum mobile.)

Durch Vermehrung der Windungszahl der Sekundären, das heißt des Resonators, ist also das Potential des Resonators erhöht worden. Aus diesen

hohen Potentialen im Verein mit diesen hohen Frequenzen ergeben sich merkwürdige Wirkungen. So kann man beispielsweise eine einpolige Glühlampe, das heißt eine solche ohne Rückleitungsdraht, leuchten lassen. Am interessantesten aber sind die physiologischen Wirkungen. Es hat sich herausgestellt, daß man ungestraft einen Draht berühren kann, in dem diese Ströme fließen, trotz ihres hohen Potentials; im allgemeinen läßt man sie aber lieber durch Induktion aus der Ferne wirken. Man erhält dabei eine allgemeine Erregung des Organismus, welche vielfach zu Heilzwecken Verwendung gefunden hat.

Zwölftes Kapitel.

Nachahmung der optischen Erscheinungen.

1. Bedingungen für die Nachahmung.

Nach der Maxwellschen Auffassung ist das Licht nichts anderes als eine elektromagnetische Störung, die sich durch die Luft, durch den leeren Raum, oder durch verschiedene durchsichtige Medien hindurch fortpflanzt. Die elektrischen Strahlungen, welche ein Erreger aussendet, unterscheiden sich also vom Licht nur durch ihre Periode; sie

rufen auf die Netzhaut nur deshalb keinen Eindruck hervor, weil sie zu kurz sind.

Wir haben ja gesehen, daß sich diese Störungen genau mit derselben Geschwindigkeit fortpflanzen wie das Licht. Das genügt aber nicht; wir müssen noch nachweisen, daß sie alle Eigenschaften des Lichtes besitzen, und daß wir mit ihnen alle optischen Erscheinungen wiederholen können.

Die Größe der Wellenlänge bildet indessen ein Hindernis; um die Verhältnisse herzustellen, unter denen wir die optischen Erscheinungen beobachten, müßten wir sämtliche Längen, dem Ähnlichkeitsprinzip entsprechend, in demselben Verhältnis vervielfachen.

Beispielsweise müßte bei Anwendung des großen Hertzschen Erregers (der eine Wellenlänge von 6 m liefert) ein Spiegel, der dieselbe Rolle spielen sollte, die ein Spiegel von 1 mm^2 gegenüber dem sichtbaren Lichte spielt, eine Fläche von einem Quadratmyriameter besitzen.

Für den kleinen Boseschen Erreger würde noch ein Spiegel von einem Quadratdekameter erforderlich sein.

Es ist klar, daß diese Bedingung immer nur unvollkommen erfüllt werden wird. Sie wird indessen um so weniger schlecht erfüllt sein, je kürzere Wellenlängen man verwenden wird. Hertz hatte bereits mit seinem kleinen Erreger recht gute Ergebnisse

erzielt, aber, wie zu erwarten stand, sind Righi und Bose, die zehnmal und hundertmal kürzere Wellen verwenden, der vollkommenen Nachahmung viel näher gekommen.

Die von Bose dargestellten kürzesten Wellen haben, wie wir sahen, eine Länge von 6 mm; die roten Wellen, die längsten unter denen, welche die Netzhaut erregen, haben eine Länge von $^{7}/_{10000}$ mm, sind also 10000 mal kürzer; es gibt aber im Sonnenspektrum viel längere Wellen, die ohne Wirkung auf die Netzhaut sind und sich uns nur durch ihre Wärmewirkungen offenbaren, das sind die *ultraroten* Wellen. Unter diesen unterscheiden wir die, welche Rubens in neuerer Zeit unter dem Namen *„Reststrahlen“* isoliert hat, und deren Wellenlänge 20 bis 30 Mikron beträgt. Unter den Wellen optischer Herkunft sind sie die längsten, die den elektrischen Wellen am nächsten kommenden; sie sind aber noch 200 mal kürzer.

2. Interferenzen.

Wir haben oben, im neunten Kapitel, von den Interferenzen gesprochen, die zwischen den unmittelbar vom Erreger ausgehenden elektrischen Strahlen und den an einem metallischen Spiegel reflektierten auftreten. Bei diesen Versuchen laufen die beiden interferierenden Strahlen, der direkte und der reflektierte, in entgegengesetztem Sinne.

Wir finden hier also Verhältnisse, die sehr verschieden sind von denen in den optischen Instrumenten, die zur Untersuchung der Interferenzen dienen, und bei denen die beiden Strahlen in demselben Sinne laufen und sich unter einem sehr spitzen Winkel schneiden. Je spitzer dieser Winkel ist, um so breiter sind die Interferenzstreifen, und um so leichter lassen sie sich daher beobachten. Aus diesem Grunde läßt man in der Optik gewöhnlich nicht zwei Strahlen von entgegengesetztem Sinne interferieren, weil sich dabei Streifen von nur einigen Zehntausendsteln Millimeter ergeben würden.

Erst in allerneuester Zeit ist es Wiener gelungen, optische Streifen zu beobachten, die unter solchen Verhältnissen zustande gekommen sind. Derartige Streifen entstehen auch bei der Lippmannschen Farbenphotographie. Bekanntlich legt Lippmann die lichtempfindliche Platte auf eine Quecksilberschicht, welche als Spiegel dient. Der direkte Strahl interferiert mit dem am Quecksilber reflektierten und im entgegengesetzten Sinne verlaufenden, und es entsteht in der lichtempfindlichen Schicht eine Reihe gleichweit voneinander abstehender Streifen. Diese Streifen sind den im neunten Kapitel besprochenen elektrischen Streifen durchaus analog.

Righi hat indessen eine bessere Nachahmung der üblichen Interferenzversuche zustande gebracht. Er läßt die elektrischen Wellen an zwei Spiegeln

reflektieren, die miteinander einen kleinen Winkel bilden. Wenn man Sorge trägt, den Resonator durch einen metallischen Schirm gegen die Wirkung des direkten Strahles zu schützen, so kann man die Interferenz der beiden reflektierten Strahlen untersuchen. Wir haben hier den Fresnelschen Zweispiegelversuch.

Man kann die beiden Spiegel auch in zwei parallelen Ebenen aufstellen, deren Abstand voneinander nicht sehr groß ist; man erhält dann eine Nachahmung des Interferenzapparates, dessen sich Michelson zur optischen Konstruktion von Zentimeter- oder Millimeter-Etalons bedient hat.

Schließlich kann man statt zweier Strahlen, die von zwei Spiegeln reflektiert sind, zwei Strahlen interferieren lassen, die durch zwei Prismen aus Schwefel gebrochen worden sind. Dann hat man den Fresnelschen Zweiprismenversuch.

3. Dünne Blättchen.

Eine der prächtigsten Interferenzerscheinungen in der Optik ist die der farbigen Newtonschen Ringe; ihr verdanken bekanntlich die Seifenblasen ihren Farbenreichtum; sie entsteht, wie man weiß, durch die Interferenz der an den beiden Oberflächen eines dünnen Blättchens reflektierten Strahlen.

Die Erscheinung der dünnen Blättchen läßt sich elektrisch nachahmen. Es ist aber alles relatif: in

der Optik muß ein Blättchen, um dünn zu sein, eine Dicke haben, die nach Tausendsteln eines Millimeters zählt; Righi, der mit 10000 oder 500000 mal größeren Wellenlängen arbeitete, verwandte dünne Paraffinplatten von 1 bis 2 cm Dicke.

4. Sekundäre Wellen.

Eine Erscheinung, die von Righi im einzelnen untersucht worden ist, ist die der sekundären Wellen. Ihr optisches Analogon ist schwerer zu verstehen und soll im nächsten Kapitel erörtert werden. Wenn ein Resonator den von einem Erreger ausgehenden Strahlen ausgesetzt wird, so gerät er in Schwingung und wird seinerseits zu einem Emissionszentrum. Man kann sich davon in der Weise überzeugen, daß man ihm einen zweiten Resonator nähert, der durch einen Metallschirm vor der direkten Strahlung geschützt ist.

Die sekundären Strahlen, welche ein Resonator dergestalt erzeugt, können mit den direkten Strahlen interferieren. Die von zwei Resonatoren erzeugten Sekundärstrahlungen können ebenfalls miteinander interferieren.

Schließlich kann infolge der Erscheinung der multiplen Resonanz, von der weiter oben ausführlich die Rede gewesen ist, ein Erreger zwei Resonatoren von verschiedener Länge in Schwingung versetzen, und diese beiden Resonatoren können nun aufeinander wirken.

Righi hat gezeigt, daß eine dielektrische Masse, wie ein metallischer Resonator, zu einem Zentrum wird, von dem sekundäre Wellen ausgehen.

Das ist keineswegs verwunderlich. Wie spricht der Resonator auf die Erregung an? In derselben Weise, sagten wir, wie die Orgelpfeife (vgl. Seite 56). In dieser Pfeife wird eine durch irgendwelche Ursache erregte Schallwelle an beiden Enden reflektiert und erleidet so eine Reihe von Reflexionen. Wenn zwischen der Tonhöhe und der Pfeifenlänge Harmonie besteht, so erzeugen alle diese so reflektierten Wellen übereinstimmende Schwingungen die zusammenwirken, und der Ton wird verstärkt.

In dem metallischen Resonator wird eine elektrische Störung an den beiden Enden des Drahtes reflektiert, und diese reflektierten Wellen können sich nach demselben Mechanismus zusammenzetzen und verstärken.

Betrachtet man eine dielektrische Masse, so verlaufen die Dinge ebenso; die elektrischen Störungen werden an den beiden Flächen reflektiert werden, von denen diese Masse begrenzt wird, gerade wie es in einem Resonator an den Enden des Metalldrahtes geschieht.

Eine dielektrische Masse ist also ein richtiger Resonator.

All diese sekundären Wellen rufen durch ihre

Interferenzen miteinander komplizierte Erscheinungen hervor, die entwirrt zu haben das große Verdienst von Righi ist.

5. Beugung.

Die Beugungserscheinungen werden um so merklicher, je größer die Wellenlänge ist. Sie lassen sich daher mit den elektrischen Wellen leicht nachahmen. Man hat die Beugungserscheinung nachgeahmt, die an einem Spalt oder am Rande irgendeines Schirmes auftreten.

Wenn man aber statt eines metallischen Schirmes ein Dielektrikum nimmt und dieses die Rolle eines undurchsichtigen Körpers spielen läßt, so sind die Erscheinungen verwickelter. Es sind dann nämlich die von dem Dielektrikum ausgehenden sekundären Wellen zu berücksichtigen. Die Anwendung des Huygensschen Prinzips und der aus diesem abgeleiteten rein geometrischen Theorie reicht daher nicht immer aus. Man kann sich in der Optik damit begnügen, weil infolge der geringen Größe der Wellenlänge die Beugung dort nur äußerst schwache Ablenkungen hervorruft. Indessen reicht die geometrische Theorie selbst für das sichtbare Licht schon nicht mehr aus, wenn es gilt die Versuche von Gouy über die Beugung durch die Schneide eines ganz scharf geschliffenen Rasiermessers zu erklären.

Bose hat die Nachahmung der Beugungserscheinungen dadurch vervollständigt, daß er richtige Gitter konstruierte und sich zur Messung der Wellenlängen seiner elektrischen Schwingungen bediente.

6. Polarisation.

Die elektrischen Schwingungen sind stets polarisiert; sie sind nämlich immer parallel zur Achse des Erregers. Sie sind demnach den Schwingungen des polarisierten Lichtes analog, deren Richtung konstant ist, und nicht denen des natürlichen Lichtes, deren Richtung sich jeden Augenblick ändert, dabei aber immer in einer zum Lichtstrahl senkrechten Ebene bleibt.

Man kann indessen die Wirkung eines Polarisators nachahmen, der, wenn er von einem bereits polarisierten Strahle durchlaufen wird, die Orientierung der Polarisationsebene verändert.

Hertz verwandte zu diesem Zwecke ein „Gitter", das aus einer gewissen Anzahl parallel ausgespannter Metalldrähte besteht. Wir haben gesehen, daß ein Metall die elektrischen Schwingungen eben deshalb aufhält, weil es leitend ist. Ein solches Gitter ist nun nur in einer Richtung leitend, nämlich in der Längsrichtung der Drähte; es wird also nur die parallel zu dieser Richtung verlaufenden Schwingungen absorbieren und die senkrecht dazu verlaufenden durchlassen.

Man darf dieses Polarisationsgitter nicht mit dem

Beugungsgitter verwechseln, das Bose angewendet hat, und das sich wie die optischen Gitter verhält. Die Wirkungsweise dieser beiden Gitter ist völlig verschieden, und diese Verschiedenheit beruht auf dem Umstande, daß der Abstand der Drähte in dem Polarisationsgitter kleiner und in dem Beugungsgitter größer ist als die Wellenlänge.

Das Polarisationsgitter besitzt in der Optik kein Analogon; man könnte es höchstens mit dem Turmalin vergleichen, der die in einer bestimmten Richtung verlaufenden Schwingungen absorbiert.

7. Polarisation durch Reflexion.

Die Metalle und die Dielektrika reflektieren die elektrischen Wellen; sie müssen also dieselben Wirkungen haben, welche die metallische Reflexion und die Reflexion an Glas auf polarisiertes Licht ausüben. Das ist von Trouton und von Klemenčič bestätigt worden. Righi glaubte eine Zeitlang, zu entgegengesetzten Ergebnissen gelangt zu sein; als er aber die Existenz der sekundären Wellen festgestellt und deren Gesetze entwirrt hatte, fand er im Gegenteil die Schlußfolgerungen seiner Vorgänger vollauf bestätigt.

Dadurch war ein wichtiger Punkt zweifelsfrei festgestellt: die elektrischen Schwingungen stehen senkrecht auf der Polarisationsebene wie die Lichtschwingungen nach der Fresnelschen Theorie.

Die Reflexion an Metallen erzeugt, wie beim Licht, eine elliptische oder zirkulare Polarisation.

Die Righischen Apparate weisen diese Polarisation sehr bequem nach. Wir geben einem Resonator verschiedene Stellungen; wenn bei einer dieser Stellungen vollständige Auslöschung erfolgt, so ist die Polarisation geradlinig; wenn die Funken unter jedem Azimut die gleiche Stärke haben, so ist die Polarisation zirkular. In den dazwischenliegenden Fällen, wenn die Stärke der Funken durch einen Mindestwert geht, ohne indessen gleich Null zu werden, ist die Polarisation elliptisch.

8. Brechung.

Man hat bereits frühzeitig aus Schwefel oder aus Paraffin Prismen und Linsen hergestellt, welche auf die elektrischen Wellen geradeso wirken wie die Prismen und Linsen aus Glas auf das Licht.

Die Brechung beeinflußt die Polarisationsebene nach denselben Gesetzen wie in der Optik. Die Wirkung läßt sich durch mehrfache Reflexion wahrnehmbar machen; man ahmt dann die optische Erscheinung der vielfachen Spiegelung nach.

Es sei hier ein merkwürdiger Versuch von Bose erwähnt: Bekanntlich wird gepulvertes Glas infolge vielfacher Reflexion für Licht undurchlässig und erhält seine Durchsichtigkeit wieder, wenn man Canadabalsam darauf gießt, der denselben Brechungs-

index hat wie das Glas. Wir füllen nun ebenso einen Kasten mit kleinen unregelmäßigen Harzstücken an. Die elektrischen Wellen können nicht hindurchdringen. Die Durchlässigkeit wird aber wieder hergestellt, wenn wir Kerosin darauf gießen.

Wir wollen nebenher erwähnen, daß gewisse Körper, wie Schwefel, für Licht deshalb undurchsichtig sind, weil sie aus kleinen Kristallen bestehen, an deren Oberfläche Reflexionen erfolgen. Sie verhalten sich wie gepulvertes Glas. Sie sind dagegen für die elektrischen Wellen durchlässig, weil diese Kristalle diesen Strahlungen gegenüber viel kleiner sind als die Wellenlänge und daher als homogen angesehen werden müssen.

9. Totalreflexion.

Die Erscheinungen der Totalreflexion und die daraus entstehende Zirkularpolarisation lassen sich sehr leicht nachahmen; hierbei erscheint mir aber ein merkwürdiger Umstand beachtenswert.

Wenn ein Lichtstrahl total reflektiert wird, so dringt nach der Theorie ein Teil der Erschütterung in das zweite Medium ein und gehorcht ganz besonderen Gesetzen. Man sieht indessen nichts, weil diese Erschütterung nur in eine Schicht eindringt, deren Dicke nicht mehr als eine Wellenlänge beträgt.

In der Optik läßt sich diese Voraussagung nicht direkt bestätigen; man mußte sich mit indirekten

Versuchen zufriedengeben, bei denen eine Erscheinung ähnlich jener der farbigen Ringe mitspielt.

Mit sehr langen Wellen wird dagegen diese Bestätigung möglich. Sie erfolgt in befriedigender Weise, so daß in diesem Falle also gerade die elektrischen Wellen uns ein Geheimnis der Lichtwellen enthüllen.

10. Doppelbrechung.

Die Kristalle sind für die elektrischen Wellen doppelbrechend; da man aber nur dünne Kristalle verwenden kann, so erhält man dieselbe Erscheinung wie im Polarisationsmikroskop, wo eine dünne Kristallplatte zwischen einen Analysator und einen Polarisator eingeschaltet wird.

Bose verwendet als Analysator und als Polarisator Hertzsche Polarisationsgitter.

Man muß sich davor hüten, zwei Erscheinungen miteinander zu verwechseln, deren Wirkungen in diesem Apparate analog sind, sich meistens übereinanderlagern und nur durch eine sorgfältige Diskussion voneinander zu trennen sind.

Die kristallinischen Körper haben nicht denselben Brechungsindex für Schwingungen von verschiedener Richtung: das ist die Doppelbrechung im eigentlichen Sinne. Andererseits absorbieren sie diese Schwingungen ungleich stark: diese Erscheinung bezeichnet man in der Optik als *Dichroïmus.*

Diese Erscheinungen sind beide beobachtet worden. Den Dichroïsmus beobachtet man besonders an Körpern von blätteriger oder faseriger Struktur, wie an Holz, an einem Buche, an einer Haarsträhne. Der Mechanismus ist dem des Hertzschen Polarisationsgitters vergleichbar.

Bose hat nachgewiesen, daß der Dichroïsmus für elektrische Wellen immer von einer ungleichen elektrischen Leitfähigkeit in den beiden Richtungen begleitet ist.

Dreizehntes Kapitel.

Synthese des Lichtes.

1. Synthese des Lichtes.

Alle diese Versuche lassen die vollkommene Analogie zwischen dem Lichte und den Strahlen elektrischer Kraft erkennen.

Diese Strahlen würden sich, wenn ihre an sich schon kleine Periode millionenmal kürzer wäre, nicht von den Lichtstrahlen unterscheiden.

Bekanntlich sendet uns die Sonne mehrere Strahlungsarten: die einen sind leuchtend, weil sie auf unsere Netzhaut wirken, die anderen sind dunkel (ultraviolett oder ultrarot) und offenbaren sich durch ihre chemischen oder ihre Wärmewirkungen. Die erstgenannten verdanken ihre Eigenschaften, durch

die sie uns von anderer Natur zu sein scheinen, nur gleichsam einer physiologischen Zufälligkeit. Für den Physiker unterscheidet sich das Ultrarot vom Rot nicht mehr als das Rot vom Grün; die Wellenlänge ist nur größer; die der Hertzschen Strahlungen ist noch viel größer; aber das sind alles nur Größenunterschiede, und wir können sagen, daß, wenn die Maxwellschen Auffassungen richtig sind, der große Bonner Forscher eine richtige Synthese des Lichtes verwirklicht hat.

Die Synthese ist indessen noch nicht vollkommen, und es entsteht zunächst eine erste Schwierigkeit gerade aus der Größe der Wellenlänge.

Bekanntlich folgt das Licht nicht genau den Gesetzen der geometrischen Optik, und die Abweichung, die die Beugung hervorruft, ist um so beträchtlicher, je größer die Wellenlänge ist. Bei den großen Wellenlängen der Hertzschen Schwingungen müssen diese Erscheinungen eine gewaltige Bedeutung erlangen und alles verwirren. Ohne Zweifel ist es, wenigstens für den Augenblick, ein Glück, daß die Hilfsmittel unserer Beobachtung so grob sind; andernfalls würde die Einfachheit, die uns auf den ersten Blick so verlockend erschienen ist, einem Wirrsal Platz machen, in dem wir uns nicht würden zurechtfinden können. Daher rühren vermutlich die verschiedenen Anomalien, die man bisher noch nicht hat aufklären können.

Demnach wäre die geringe Größe unseres Körpers und aller Gegenstände, die wir benutzen, das einzige Hindernis für eine vollkommene Synthese. Für Riesen, die gewohnheitsmäßig die Längen nach Tausenden von Kilometern zählten, also nach Millionen von Wellenlängen der Hertzschen Erreger, die die Zeit nach Millionen Hertzscher Schwingungen zählten, für solche Riesen wären die Hertzschen Strahlen vollkommen dasselbe, was für uns das Licht ist.

2. Sonstige Unterschiede.

Leider gibt es noch weitere Unterschiede. Zunächst werden die Hertzschen Schwingungen sehr schnell gedämpft, während die Dauer der Lichtschwingungen nach Billionen von Schwingungen zählt. Daraus erklärt sich, wie wir sahen, die Erscheinung der multiplen Resonanz, für die es in der Optik kein Analogon gibt.

Aber hiermit nicht genug: wir vergegenwärtigen uns, was das natürliche Licht ist: während einer Zehntelsekunde, (also während der Beharrungsdauer der Eindrücke auf der Netzhaut), ändern sich die Richtung der Schwingung, ihre Intensität, ihre Phase, ihre Periode millionenmal, und trotzdem bleiben sie während Millionen von Schwingungen merklich konstant. Die Anzahl der Schwingungen in einer Sekunde rechnet nämlich nach Millionen von Millionen.

Bei den Hertzschen Wellen ist es durchaus nicht ebenso:

Erstens nehmen sie nicht wie die Schwingungen des natürlichen Lichtes alle möglichen Orientierungen an; sie behalten eine konstante Orientierung wie die Schwingungen des polarisierten Lichtes.

Zweitens ist ihre Intensität weit davon entfernt, während Millionen von Schwingungen konstant zu bleiben; sie nimmt vielmehr sehr rasch ab, so daß sie nach einer kleinen Zahl von Schwingungen Null wird. Wenn die Schwingungen erloschen sind, so beginnen sie nicht sofort mit neuer Intensität, neuer Phase und neuer Orientierung wieder, die von den früheren verschieden sind; es entsteht vielmehr eine lange Pause, die viel länger ist, als die Aktivitätsperiode war, und die erst unterbrochen wird, wenn der Unterbrecher des Induktors von neuem arbeitet.

Wir haben oben (Seite 117) gesehen, daß die von einem Erreger ausgestrahlte Energie nicht in allen Richtungen dieselbe ist, daß sie vielmehr nach der Richtung, die wir als die äquatoriale bezeichnet haben, am stärksten und nach den Polen hin Null ist. Warum begegnen wir beim Licht nicht denselben Gesetzmäßigkeiten wieder?

Die Lichtquelle sendet ebensowenig in irgendeinem Augenblick eine gleiche Energiemenge nach allen Seiten hin aus; es besteht ebenfalls ein Maxi-

mum am Äquator; *nur hat sich in einer Zehntelsekunde der Äquator so oft verändert, daß er alle möglichen Lagen angenommen hat,* und daraus folgt, daß unser Auge, das nur Mittelwerte wahrnimmt, eine gleichförmige Beleuchtung feststellt.

Was wäre also erforderlich, um eine vollkommene Synthese des Lichtes zu erhalten? Wir müßten auf einen kleinen Raum eine ungeheure Anzahl von Erregern konzentrieren, die nach allen Richtungen orientiert sein müßten; wir müßten diese Erreger gleichzeitig oder nacheinander, aber ohne Unterbrechung, betreiben, so daß der zweite in Bewegung geriete, ehe die Schwingungen des ersten vollständig aufgehört hätten. Schließlich müßten wir, um die Wirkungen festzustellen, ein Instrument haben, welches die mittlere Energie aufzeichnete und gleichsam eine Netzhaut wäre, auf der die Eindrücke während Billionen Hertzscher Schwingungen bestehen blieben.

Was wir dann erhalten würden, wäre das Analogon zum weißen Licht, *selbst dann, wenn all diese Erreger dieselbe Periode hätten,* und zwar wegen der Dämpfung.

Um irgendein Analogon zu einem merklich monochromatischen Licht zu erhalten, müßten die Erreger nicht nur nahezu dieselbe Periode haben, sondern auch eine außerordentlich schwache Dämpfung besitzen.

3. Erklärung der Sekundärwellen.

Es ist weiter oben (Seite 143—145) von den sekundären Wellen die Rede gewesen, welche Righi entdeckt hat, und welche von Resonatoren oder dielektrischen Massen ausgehen, die in die Nähe eines Erregers gebracht werden. Diese Erscheinungen scheinen zunächst kein optisches Analogon zu haben.

Man kann sie nicht mit den Vorgängen vergleichen, die auftreten, wenn ein Körper das durch ihn hindurchgehende Licht absorbiert und dann seinerseits heiß genug wird, um selbst leuchtend zu werden. In diesem Falle erfolgt die Umwandlung nicht unmittelbar, und es muß zunächst die Wärme als Bindeglied dazwischen treten; überdies besteht kein notwendiger Zusammenhang zwischen der Phase der von dem glühenden Körper ausgesandten Schwingungen und jener der erregenden Schwingungen. *Diese Schwingungen können also nicht miteinander interferieren.*

Ebensowenig darf man sie mit den Erscheinungen der Phosphoreszenz vergleichen, denn die von dem phosphoreszierenden Körper ausgesandten Schwingungen können gleichfalls nicht mit den erregenden Schwingungen interferieren.

Das Gleichnis muß anderswo gesucht werden.

Wenn sekundäre Wellen gebildet werden, so geschieht das, weil ein Teil der erregenden Strahlung

durch den Erreger oder die dielektrische Masse *gebeugt* worden ist.

Nur unterscheidet sich diese „Beugung“ sehr stark von der, an die wir gewöhnt sind.

Zunächst sind die Ablenkungen gewaltig, weil die Abmessungen der beugenden Körper mit den Wellenlängen vergleichbar sind. Zweitens sind die Erscheinungen von der Natur dieser Körper abhängig, und nicht nur von ihrer Gestalt, wie es die geometrische Theorie von Fresnel fordert. Diese Theorie ist aber nur eine Annäherung und nur auf kleine Ablenkungen anwendbar; das ist durch die Versuche von Gouy über das an der Schneide eines Rasiermessers gebeugte Licht nachgewiesen worden.

Endlich sind die sekundären Wellen, welche von den Resonatoren hervorgerufen werden, im allgemeinen ihrer Natur nach nicht mit den einfallenden Wellen identisch. Ebenso ist es in der Optik: auch hier ist das gebeugte Licht seiner Natur nach nicht mit dem einfallenden Lichte identisch; so ist, wenn das einfallende Licht weiß ist, das gebeugte Licht gewöhnlich farbig.

Bei den Versuchen von Hertz und von Righi tritt uns nur diese Veränderung des Lichtes durch die Beugung in einer ganz ungewohnten Gestalt entgegen, und daher erkennen wir sie nicht sogleich.

Die Dämpfung des Erregers ist stärker als die des Resonators; es kommt vor, daß die sekundären

Wellen, die dem gebeugten Lichte entsprechen, noch fortbestehen, nachdem die einfallenden Wellen verschwunden sind. Diese paradoxe Form der Beugung wird uns ganz natürlich erscheinen, wenn wir ein wenig darüber nachdenken.

Eine gedämpfte Schwingung läßt sich nämlich von einem bestimmten Gesichtspunkte aus mit einer zusammengesetzten Schwingung vergleichen, deren Komponenten frei von Dämpfung sind.

Was geschieht nun nach Verlauf einer gewissen Anzahl Schwingungen? Man beobachtet, daß jede dieser Komponenten ihre Intensität beibehalten hat, während die resultierende Schwingung erloschen ist. Wie kommt das zustande? Die Resultante erlischt deshalb, weil die Komponenten einander gegenseitig durch Interferenz vernichten.

Die Beugung wird diese zusammengesetzte Schwingung auflösen, wie sie das weiße Licht auflöst, indem sie die einzelnen Farben voneinander trennt. Wenn sie nur eine einzige von den Komponenten fortbestehen läßt, so wird die gegenseitige Interferenz der verschiedenen Komponenten nicht mehr zur Auslöschung führen.

Das einfallende Licht, in dem alle Komponenten zugleich enthalten sind, wird also ausgelöscht werden können, während das gebeugte Licht, das nur eine einzige Komponente enthält, noch leuchten wird.

Bei gewöhnlichem Licht tritt eine solche Erscheinung niemals auf; ebensowenig würde sie bei Hertzschem Licht dann auftreten, wenn wir statt eines einzigen Erregers deren eine sehr große Zahl haben würden, die sich in der oben (Seite 155) geschilderten Weise verhalten würden.

Sie würden zu irgendwelchen Zeitpunkten, aber unabhängig voneinander, zu arbeiten anfangen, und sie würden zahlreich genug sein, daß man nicht zu fürchten brauchte, das Zusammenarbeiten könnte jemals unterbrochen werden. Wir hätten damit eine vollkommenere Synthese des Lichtes, und man sieht, daß in diesem Falle die einfallenden Wellen nicht mehr verlöschen würden.

Ein in neuerer Zeit ausgeführter Versuch hat übrigens die optischen Analogien der Righischen sekundären Wellen noch deutlicher offenbart.

Garbasso fing die Hertzschen Strahlen auf einer Art diskontinuierlichen Schirmes auf. Dieser bestand aus einer gewissen Anzahl identischer Resonatoren. Dieser Schirm nun reflektierte sekundäre Strahlen, deren Periode und deren Dämpfung die diesen Resonatoren zukommenden waren.

Diese Erscheinung, deren Analogie mit der Erscheinung der sekundären Wellen auf der Hand liegt, hat sich in der Optik nachahmen lassen: man nimmt eine versilberte Glasplatte, entfernt die Versilberung durch Schnitte von gleichem Abstande, die einem

sehr feinen Netz von Quadraten sehr ähneln, so daß das übrigbleibende Silber eine große Zahl ganz kleiner Rechtecke bildet, die richtigen Resonatoren vergleichbar sind.

Dieser Apparat verhält sich dem ultraroten Licht, und besonders den Rubensschen *Reststrahlen* gegenüber gerade so, wie sich der Apparat von Garbasso, dessen Nachahmung in wesentlich veränderten Abmessungen er darstellt, gegenüber den Hertzschen Strahlen verhält.

4. Verschiedene Bemerkungen.

Zwei Lichtstrahlen, die nicht denselben Ursprung haben, können nicht miteinander interferieren, und zwar aus folgendem Grunde: wie wir gesehen haben, geht alles so vor sich, als ob jeder von ihnen durch eine große Anzahl von Erregern hervorgebracht würde, die unabhängig voneinander und in unregelmäßigen Abständen zu schwingen anfingen.

Während einer Zehntelsekunde beginnen alle diese Erreger nacheinander zu arbeiten, und die Phasendifferenz der beiden interferierenden Strahlen ändert sich eine sehr große Anzahl von Malen; bald verstärken sie sich, bald heben sie sich auf; das Auge, das nur einen Mittelwert wahrnimmt, sieht also weder eine Verstärkung, noch eine Schwächung; es sieht keine Interferenzen. Ein einzelnes Paar von Erregern würde Interferenzstreifen erzeugen, aber

die verschiedenen Streifensysteme, die von den einzelnen Erregerpaaren herrühren, lagern sich nicht übereinander, sie verwirren sich untereinander, und man sieht nur noch eine gleichförmige Beleuchtung.

Dieselben Gründe gelten nicht mehr für den Fall zweier Hertzschen Strahlungen, von denen jede durch einen einzigen Erreger, mit einer einzigen Unterbrechung in der Primären des Induktoriums hervorgebracht wird. Es besteht keine Veranlassung dafür, daß die Interferenzstreifen sich verwirren, denn es ist nicht mehr als ein Streifensystem vorhanden, die beiden Strahlen müssen also miteinander interferieren können, obschon sie verschiedenen Ursprungs sind

Man wird die Interferenzen nicht immer leicht sehen können, weil im allgemeinen der zweite Erreger erst zu lange nach dem Verklingen des ersten schwingen wird; man könnte es indessen ermöglichen, wenn man die beiden Erreger von einem und demselben Induktorium speisen würde, und wenn die Dämpfung nicht zu groß ist. Darin besteht ein weiterer Unterschied gegen die Optik.

Man kann sich ferner fragen, was das optische Analogon zu der Fortpflanzung längs eines Drahtes ist. Die entsprechende optische Erscheinung läßt sich nicht darstellen, weil sie in Anbetracht der geringen Wellenlänge, in der Luft, wie im Metall, auf eine Schicht von ein bis zwei Tausendstel Millimeter Dicke beschränkt bleibt.

Man könnte höchstens einen Vergleich mit den leuchtenden Springbrunnen *(fontaines lumineuses)* ziehen, bei denen die Lichtenergie längs eines Flüssigkeitsstrahles fortschreitet. Dieser Vergleich ist zwar nicht ganz so grob, wie er scheint, aber doch sehr unvollkommen, denn die metallischen Drähte sind leitend, während der Flüssigkeitsstrahl sich dem Lichte gegenüber wie ein durchsichtiges Dielektrikum verhält.

Nichtsdestoweniger würde sich zweifellos die Erscheinung der leuchtenden Springbrunnen mit den Hertzschen Strahlen nachahmen lassen.

Man würde dann eine Reihe von Modellen mit Dielektriken herstellen, deren Induktionsvermögen ε (vgl. das zehnte Kapitel) immer größer und größer wäre, und der Fall eines metallischen Drahtes würde am Ende dieser Reihe als Grenzfall erscheinen.

5. Der singende Lichtbogen.

Wir sahen, daß eine der hauptsächlichsten Verschiedenheiten zwischen den Hertzschen Wellen und den Lichtwellen auf der schnellen Dämpfung der ersteren beruht. Die Anordnung des *singenden Lichtbogens* gestattet, diese Verschiedenheit in gewissem Grade zum Verschwinden zu bringen.

Wenn ein elektrischer Lichtbogen mit Gleichstrom gespeist wird, und wenn man in einen Nebenschluß dazu eine Selbstinduktion und einen Kondensator schaltet, so hat man ein gewisses Analogon zum

Hertzschen Erreger: der Kondensator im Nebenschluß vertritt dabei die beiden Kapazitäten des Erregers, und der Lichtbogen spielt dabei die Rolle der Funkenstrecke. Unter gewissen Verhältnissen erlischt der Bogen bei jeder Schwingung und setzt dann wieder ein. An Stelle der einmaligen Auslösung, von der im vierten Kapitel die Rede war, und die eine Reihe schnell gedämpfter Schwingungen hervorruft, haben wir hier eine Reihe aufeinanderfolgender Auslösungen, die sich bei jeder einzelnen Schwingung wiederholen. Diese Schwingungen werden *unterhalten*, wie die Schwingungen der Unruhe in unseren Uhren. Wir haben hier ein richtiges *elektrisches Echappement.*

Für diesen Zweck ist es notwendig, daß die Kathode heiß bleibt, weil sich der Lichtbogen sonst nicht wieder entzünden würde. Man hat zunächst Schwingungen verwirklicht, deren Frequenz jener der Schallwellen gleichkommt, und die sich leicht mit dem Ohre wahrnehmen lassen. Daher stammt die Bezeichnung „singender Lichtbogen".

Poulsen hat im Hinblick auf die Verwendung für die drahtlose Telegraphie durch verschiedene Kunstgriffe Frequenzen von 1 bis 2 Millionen in der Sekunde erreicht und die absolute mechanische Leistung auf 1 Kilowatt zu bringen vermocht.

Das auf diese Weise erzeugte Licht kann als Analogon zu dem gewöhnlichen Licht angesehen

werden, aber als *vollständig polarisiert und streng monochromatisch.* Leider ist die Wellenlänge zu groß, als daß man damit den eben beschriebenen analogen Versuch ausführen könnte.

Vierzehntes Kapitel.

Das Prinzip der drahtlosen Telegraphie.

1. Das Prinzip der drahtlosen Telegraphie.

Wie wir seit den Arbeiten Faradays wissen, entstehen in einem metallischen Leitungskreise, der in die Nähe eines intermittierenden Stromes, eines Wechselstromes oder eines veränderlichen Stromes gebracht wird, sekundäre Ströme, die man *induzierte Ströme* nennt. Diese Wirkung ist in der Entfernung, sowohl durch einen Isolator hindurch, als durch die Luft oder durch einen Leiter hindurch, nachweisbar. Wir haben hier, wenigstens in der Theorie, ein Mittel, ohne Vermittelung jeglichen Drahtes Zeichen in die Ferne hinzusenden.

Aber dieser Gedanke schien lange ein schöner Traum zu sein. Mit den Hilfsmitteln, über die man früher verfügte, konnten die Induktionswirkungen nur auf sehr kurze Entfernungen hin wahrnehmbar sein, auf Entfernungen, die viel zu klein waren, als daß man daran hätte denken können, daraus Nutzen zu ziehen.

Mit den Versuchen von Hertz aus dem Jahre 1888 ist die Frage in eine neue Phase getreten.

Wir haben diese Versuche bereits in den vorauf-gegangenen Kapiteln beschrieben. Je nach den Abmessungen des Apparates bewegt sich die Periode der Schwingungen, wie erwähnt, zwischen $2 \cdot 10^{-8}$ und $2 \cdot 10^{-10}$ Sekunden.

Die Induktionswirkungen beruhen auf den Änderungen der Primärstromstärke und sind daher um so stärker, je schneller diese Änderungen erfolgen. Es ist daher natürlich, daß Hertz mit derartigen Frequenzen diese Wirkungen in mehreren Metern Entfernung hat beobachten können.

Hertz hatte eine richtige Synthese des Lichtes bewirkt; somit fand die Maxwellsche Anschauungsweise ihre Bestätigung, nach der das Licht auf elektrischen Wechselvorgängen von sehr kurzer Periode beruht.

Die scheinbaren Verschiedenheiten beruhen nur auf der Dauer der Periode, oder auf dem, was man die *Wellenlänge* nennt, das heißt, auf dem Wege, den das Licht während einer Periode durchläuft. Wenn diese Länge einige Zehntausendstel Millimeter beträgt, so haben wir sichtbare Strahlen, wenn sie einige Zentimeter oder einige Meter beträgt, so haben wir Hertzsche Wellen; beim Übergang von den kürzesten Wellen zu den längsten begegnen wir also der Reihe nach den chemisch wirksamen unsichtbaren

ultravioletten Strahlen, den violetten, den blauen, den grünen, den gelben, den roten Strahlen, den unsichtbaren Wärmestrahlen, und schließlich den Hertzschen Strahlen; es besteht also zwischen diesen Strahlen und dem sichtbaren Licht kein anderer Unterschied als zwischen dem grünen Licht und dem roten.

Wenn nun aber das gewöhnliche Licht uns gestattet, durch die optische Telegraphie Zeichen in die Ferne zu senden, warum sollte uns da das Hertzsche Licht, wenn ich mich so ausdrücken darf, nicht auch eine Lösung des Problems der Telegraphie ohne Draht an die Hand geben?

2. Unmöglichkeit, die Strahlung zu konzentrieren.

Allerdings verfügt die optische Telegraphie über ein Hilfsmittel, das der Hertzschen Telegraphie fehlt: sie konzentriert das Licht mit Hilfe von Linsen und Spiegeln, sie verwandelt die von einer Lichtquelle ausgehenden divergenten Strahlen in ein Bündel paralleler Strahlen und entsendet sie nach einer einzigen Richtung. Bei den Hertzschen Strahlen, also bei Wellen von großer Wellenlänge, ist das nicht mehr möglich.

Man sagt im allgemeinen, daß das Licht sich in gerader Linie fortpflanze, aber das ist nur annäherungsweise richtig; an den Rändern eines Lichtstrahlenbündels weichen die Strahlen mehr oder

weniger stark von ihrer geradlinigen Bahn ab, und diese Erscheinung, die man als *Beugung (Diffraktion)* bezeichnet, ist um so stärker ausgesprochen, je größer die Wellenlänge ist. Wenn das sichtbare Licht merklich geradlinig fortschreitet und den bekannten Gesetzen der Reflexion und der Brechung gehorcht, so geschieht dies deshalb, weil seine Wellenlänge kleiner ist als ein Tausendstel Millimeter, somit außerordentlich klein im Verhältnis zu den Abmessungen der Hindernisse, auf die es trifft, der Linsen, durch die es hindurchgeht, der Spiegel, von denen es reflektiert wird.

Um die Hertzschen Wellen zu konzentrieren, müßten wir also Linsen haben, die gewaltig viel größer wären als die Wellenlänge dieser Wellen; anderenfalls würde die Beugungserscheinung vorwiegen, und die Brechung würde nicht mehr regelmäßig erfolgen. Für Wellen von mehreren Metern Länge müßten wir den Linsen einen Durchmesser von mehreren Kilometern geben, selbst für Wellen von einigen Zentimetern Länge brauchten wir noch sehr große Linsen.

Übrigens besteht noch ein weiterer Grund, der uns nicht an die Verwendung dieser kurzen Wellen zu denken gestattet.

Righi ist wohl imstande gewesen, sehr kurze Wellen zu erhalten, aber mit sehr kleinen Erregern von sehr geringer Kapazität, in denen man folglich nur sehr

wenig Elektrizität, d. h. sehr wenig Energie ansammeln kann. Dabei werden die Wirkungen zu schwach, um in der Telegraphie Anwendung finden zu können.

3. Übermittelte Energiemenge.

Eine Konzentration ist also nicht möglich. Wie groß die Schwierigkeit ist, verstehen wir, wenn wir uns klarmachen, wie schwach die in einem Erreger erzeugte Energie ist. Das können wir durch folgende Überlegung: bei jeder Entladung wird eine gewisse Energiemenge in dem Erreger angesammelt, Diese Energie erzeugt die Schwingungen, und diese Schwingungen würden unbegrenzt fortdauern, wenn diese Energie sich nicht zerstreute. Sie zerstreut sich aber auf zweierlei Art: einmal teilt sie sich durch Strahlung dem umgebenden Äther in Gestalt Hertzscher Wellen mit, und das ist der Teil der Energie der nutzbar ist; zweitens zerstreut sie sich durch den Widerstand der Leiter, der auf die elektrischen Schwingungen geradeso wirkt, wie die Reibung auf ein Pendel wirken würde; infolgedessen erwärmen sich die Leiter, und ein Teil der Energie wird in Wärme umgewandelt und geht dabei endgültig verloren. Die kleine Strecke, auf welcher der Funke übergeht, bietet bei weitem den größten Widerstand; infolgedessen wird fast diese ganze Energie bei der Erzeugung des Lichtes und der Wärme des Funkens verbraucht und verloren.

Wenn wir uns zunächst mit einer überschläglichen Rechnung begnügen wollen, so können wir annehmen, daß die auf diese Weise verlorene Energie den zehnten Teil der gesamten Energiemenge beträgt. Wir finden aber diese verlorene Energie nicht ganz unter der Form sichtbaren Lichtes wieder; der größere Teil nimmt vielmehr die Form dunkler Wärme an. Da aber die Temperatur des Funkens außerordentlich hoch und folglich seine Leuchtökonomie sehr gut ist, so können wir immerhin annehmen, daß ein Zehntel der Energie des Funkens in sichtbarem Lichte besteht. Nach dieser Rechnung, würde die Lichtenergie des Funkens den hundertsten Teil der Energie der Hertzschen Wellen betragen; sie müßte also unter sonst gleichen Verhältnissen zehnmal weniger weit dringen. (Ich sage zehnmal im Hinblick auf das Gesetz vom Quadrate der Entfernungen). Wenn also die menschliche Netzhaut dieselbe Empfindlichkeit hätte wie die Apparate, mit denen wir die Hertzschen Wellen auf 300 km Entfernung nachweisen, so müßten wir den Funken 30 km weit sehen, und zwar ohne Zuhilfenahme irgendeiner Konzentrationsvorrichtung. Wir sind weit von diesem Rechnungsergebnis entfernt und müssen daher folgern, daß die Telegraphie ohne Draht niemals hätte funktionieren können, wenn nicht ein Apparat erfunden worden wäre, der viel empfindlicher ist als unsere Netzhaut, welche dabei

an sich schon ein Instrument von wunderbarer Feinheit darstellt.

Neuere Versuche von Tissot liefern uns übrigens genauere Angaben. Bei einem Apparat von mittlerer Leistung beträgt die bei jedem Funken ausgesandte Energie nur einige Zehntel Meterkilogramm. Die Empfangsantenne, die alles aufnimmt, was auf ihre ganze Länge und auf eine Breite von 1 m auffällt, fängt dabei im Abstande von 1 km eine Energiemenge auf, die imstande ist, ein Gewicht von 5 Zentigramm 1 cm hoch zu heben. In 100 km Abstand würde diese Energiemenge natürlich zehntausendmal kleiner sein.

4. Kurze Beschreibung der Apparate.

Der Apparat von ausgesuchter Empfindlichkeit, ohne den die drahtlose Telegraphie immer ein schöner Traum geblieben sein würde, ist der *Kohärer* oder Radiokonduktor, von dem im sechsten Kapitel ausführlich die Rede gewesen ist, und auf den wir daher hier nicht weiter einzugehen brauchen.

Ein weiteres wesentliches Organ der drahtlosen Telegraphie ist die *Antenne,* deren Erfindung wir Popoff verdanken. Es ist eine lange senkrechte Metallstange von 10 bis 50 m Länge, die von einem Maste getragen wird. Sie ist mit einer der beiden Hälften des Erregers verbunden, (der, wie ich noch einmal erwähnen will, aus zwei Leitern besteht, zwi-

schen denen ein Funke übergeht); die andere Hälfte des Erregers ist mit der Erde verbunden.

Ich werde die Rolle der Antenne weiter unten erörtern.

Der Sender besteht also aus einem Erreger, dessen eine Hälfte mit der Antenne und dessen andere Hälfte mit dem Erdboden verbunden ist (siehe Fig. 6).

[Diese Figur ist, ebenso wenig wie die folgenden, auch nur annähernd im Maßstab gezeichnet. Da die Antenne 50 m lang ist, wären die anderen Teile nicht zur Darstellung gekommen, wenn die Verhältnisse hätten gewahrt bleiben sollen.]

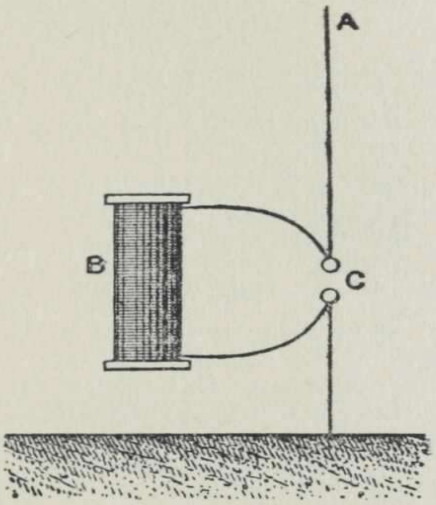

Fig. 6.
Schematische Darstellung des Senders.
A, Antenne. *C*, Funkenstrecke. *B*, Induktor.

Der Empfänger besteht aus einer anderen Antenne und einem Kohärer, dessen eine Elektrode einerseits mit der Antenne des Empfängers, andererseits mit einem der Pole einer Batterie verbunden ist, während die andere Elektrode des Kohärers einerseits mit der Erde, andererseits mit dem anderen Pole der Batterie in Verbindung steht (siehe Fig. 7).

Wenn man nun an der Gebestation den Induktor in Betrieb setzt, so entstehen elektrische Schwingungen in dem aus Erreger und Antenne bestehenden

System, und die Energie dieser Schwingungen wird in Gestalt Hertzscher Wellen ausgestrahlt werden; sie wird die Empfangsantenne erreichen; dann werden induzierte oszillatorische Ströme von dieser Antenne zum Erdboden durch den Kohärer hindurch auftreten. Diese Ströme werden zwar äußerst schwach sein, aber doch ausreichen, um den Kohärer zu beeinflussen, der nun leitend wird. Der Batteriestrom wird dann durch den Kohärer fließen und einen Morseapparat betätigen. Ein kleiner Neeffscher Hammer, der periodisch auf den Kohärer klopft, läßt diesen seine Leitfähigkeit verlieren und befähigt ihn dadurch, ein neues Zeichen aufzunehmen.

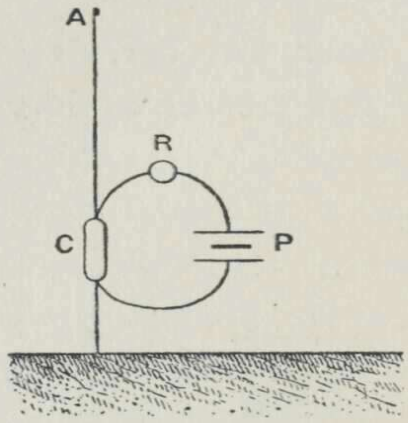

Fig. 7.
Schematische Darstellung des Empfängers.
A, Antenne. *R*, Relais zum Betrieb des Morseapparates.
P, Stationsbatterie.
C, Kohärer.

5. Theoretische Erklärungen.

Einige Gelehrte weigern sich, die klassische Erklärung der drahtlosen Telegraphie anzunehmen, und führen verschiedene Beweise ins Feld, die wir nunmehr prüfen wollen:

1. Sie wundern sich darüber, daß die Wirkung auf Hunderte von Kilometern wahrnehmbar sein könne, wenn sie nach demselben Gesetz wie das Licht mit

der Entfernung abnimmt. Sie schließen daraus, daß die Fortpflanzung in irgend einer anderen Weise erfolge, so daß die Abnahme mit der Entfernung weniger schnell fortschreite. Sie haben aber bisher noch keine Fortpflanzungsmöglichkeit zu finden vermocht, die mit unserer Kenntnis von der Elektrizität im Einklang zu stehen scheint.

2. Sie bemerken, daß die Hertzschen Wellen Hindernisse umgehen und sich nicht geradlinig fortpflanzen wie das Licht. Dabei vergessen sie, daß das Licht gleichfalls nur annähernd geradlinig fortschreitet, und daß infolge der Beugung ein Teil des Lichtes in den geometrischen Schatten eindringt. Nun ist die Beugung um so ausgeprägter, je größer die Wellenlänge ist. Die Hertzschen Wellen, die doch millionenmal länger sind als die Lichtwellen, werden daher viel leichter in den geometrischen Schatten eindringen und auf diese Weise Hindernisse umgehen, die uns gewaltig erscheinen, wie kleine Hügel oder wie die Krümmung der Erdkugel, die bei Entfernungen von mehreren Hundert Kilometern ein Hindernis von mehreren Hundert Metern Höhe darstellt.

3. Sie weisen darauf hin, daß die Fortpflanzung über das Meer hin viel leichter erfolgt als über Land; das wird in der Tat durch alle Erfahrung bestätigt. Daraus schließen sie nun, daß die Leitfähigkeit des Erdbodens eine überwiegende Rolle spiele. Aber

beruht diese Tatsache auf der Leitfähigkeit des Meerwassers, die übrigens für Ströme von hoher Frequenz sehr schwach ist, oder ist sie aus der Abwesenheit geometrischer Hindernisse zu erklären? Das ist einstweilen noch schwer zu sagen.

Ein direkter Versuch hat übrigens gezeigt, daß ein Kohärer funktionierte, wenn er auf den Boden eines in die Erde gegrabenen Loches gestellt, *aber nicht bedeckt* wurde, daß er dagegen unwirksam blieb, wenn er eingegraben war: daraus geht klar hervor, daß die Wellen nicht durch Leitung durch die Erde gehen, daß sie infolgedessen die Hindernisse nicht durchdringen, sondern sie durch Beugung umgehen.

Andererseits ist es richtig, daß die Reichweite merklich verdoppelt wird, wenn der Erreger geerdet ist; den Grund hierfür werden wir gleich kennen lernen. Wenn man aber die Erdverbindung aufhebt, so wird die Reichweite nur vermindert, während doch die Übermittelung vollständig aufhören müßte, wenn sie durch die Erde hindurch erfolgte. Die Versuche des Kapitäns Ferrié haben diesen Sachverhalt außer Zweifel gestellt.

6. Messung der Wellenlänge.

Kurzum, keiner der angeführten Beweisgründe erschien der Mehrzahl der Physiker überzeugend. Es tritt aber eine andere Frage auf: Der Erreger

besteht aus zwei kleinen Kugeln, zwischen denen der Funke übergeht; haben nun die Wellen dieselbe Periode, als ob diese beiden Kugeln isoliert wären? oder wirkt etwa das aus der Antenne, den beiden Kugeln und dem Erdboden bestehende System wie ein großer Erreger, der dann viel längere Wellen aussenden würde? Nach der ersten dieser beiden Annahmen, an der man lange festgehalten hat, würde die Antenne nur die Rolle eines Leitungsdrahtes spielen, der die von den beiden kleinen Kugeln ausgehenden Wellen bis zu seinem oberen Ende leiten und sie dann an den Äther übermitteln würde.

Keine dieser beiden Hypothesen ist widersinnig; der Apparat könnte sowohl lange als kurze Wellen aussenden, geradeso wie eine schwingende Saite mehrere harmonische Töne zu geben vermag. Der Versuch hat indessen zugunsten der zweiten Hypothese entschieden. Der Schiffsleutnant Tissot hat die Periode direkt mit Hilfe eines rotierenden Spiegels gemessen und sie zu $0{,}06 \cdot 10^{-6}$ bis $1{,}8 \cdot 10^{-6}$ Sekunden gefunden. Die Wellen sind also 100- bis 1000 mal länger als die, welche Hertz erhalten hat, 10000- bis 100000 mal länger als die von Righi und 1000000000 mal länger als die Lichtschwingungen.

Eben diesem Umstande ist es zu verdanken, daß die Messung möglich gewesen ist: die von Hertz

erzeugten Schwingungen wären zu schnell gewesen, und der rotierende Spiegel hätte den Funken nicht zu zerlegen vermocht. Wir haben damit gleichzeitig eine Bestätigung des periodischen Charakters der Erscheinung.

Um die Prüfung der Theorie vollständig durchzuführen, bliebe noch die Fortpflanzungsgeschwindigkeit zu messen. Die Aufgabe erscheint nicht unangreifbar; es scheint, daß eine und dieselbe Erschütterung, die vom Erreger ausgeht, einer und derselben Station auf zwei Wegen übermittelt werden könnte, durch einen Draht und durch die Luft. An der Ankunftsstation würden dann zwei Funken überspringen, und ein rotierender Spiegel würde den Zeitraum zu schätzen gestatten, der sie voneinander trennt. Man würde also die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Hertzschen Wellen durch die Luft und ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit in einem Drahte miteinander vergleichen können; die letztere ist nun durch die Versuche von Blondlot bestimmt worden.

Ebenso interessant wäre es, zu wissen, welche Energiemenge in schräger Richtung ausgestrahlt wird; das ließe sich aber nur durch Versuche im Luftballon ermitteln.

Ferrié hat mit Fesselballons Versuche ausgeführt, deren Ergebnisse nicht ganz zugunsten der Theorie sprechen; es wäre wünschenswert, daß derartige Versuche mehrfach wiederholt würden.

7. Die Rolle der Antenne.

Zum Schlusse dieser theoretischen Betrachtungen möchte ich noch über die Rolle der Antenne sprechen. Die Erfahrung hat gelehrt, daß die Länge der Antennen der Quadratwurzel aus der zu überbrückenden Entfernung proportional sein soll. Weshalb? Vielleicht, damit die Gerade, welche die Enden der beiden Antennen miteinander verbindet, nicht die Erde trifft? Nein, dazu wären viel größere Antennen nötig. Der Grund ist vielmehr darin zu suchen, daß man durch Vergrößerung der Antennenlänge die Wellenlänge vergrößert und infolgedessen auch die Beugungserscheinung verstärkt, dank welcher das aus der Krümmung des Erdballes entstehende Hindernis umgangen werden kann.

Je länger übrigens die Empfangsantenne ist, um so größer ist die Fläche, von der die Strahlungen aufgefangen werden; der Sachverhalt ist geradeso, als wenn man ein entferntes Licht durch ein Fernrohr betrachtete, dessen Objektivöffnung sehr groß ist.

Wenn es einen Vorteil bietet, den Erreger mit der Erde zu verbinden, so ist der Grund hierfür der, daß auf diese Weise die Kapazität des zweiten Teiles des Erregers praktisch unendlich wird. Dadurch wird die Wellenlänge verdoppelt.

Warum muß nun die Antenne senkrecht stehen? Die Strahlungsquellen des natürlichen Lichtes liefern Schwingungen, deren Richtung sich beständig ändert;

folglich wird die Energie nach allen Seiten hin gleichmäßig ausgestrahlt. Bei Verwendung einer senkrechten Antenne ist dagegen die geradlinige Schwingung immer senkrecht; sie ist *natürlich polarisiert.* Daraus folgt, daß mehr Energie in der wagerechten Ebene, das heißt also in nutzbaren Richtungen, ausgestrahlt wird als in senkrechter oder in schräger Richtung. Es läßt sich berechnen, daß anderthalbmal mehr Energie in der Horizontalebene ausgestrahlt wird, als wenn die Emission so wie die des natürlichen Lichtes erfolgen würde, und dreimal mehr nutzbare Energie, weil die Empfangsantenne die ganze Schwingung ausnutzt, die sie empfängt, und die, wie sie selbst, senkrecht ist. Im Falle einer Strahlung dagegen, die dem natürlichen Lichte vergleichbar wäre, würde irgend ein Empfangsapparat nur die Hälfte der Energie ausnutzen können, die er empfängt, nämlich die der Schwingungen, welche die gleiche Richtung haben wie er selbst.

Man würde sich aber hiermit nur eine unzureichende Vorstellung von der Überlegenheit der geradlinigen Erreger machen. Ein gekrümmter Erreger, wie er beispielsweise durch einen nahezu geschlossenen Draht gebildet werden würde, der die beiden Belegungen eines Kondensators miteinander verbindet, ein solcher Erreger würde keineswegs einer Strahlungsquelle natürlichen Lichtes zu vergleichen sein. Wir würden damit eine Art ge-

schlossenen Stromkreises haben, und folglich einen Leitungs- und einen Rückleitungsdraht, deren entgegengesetzt gerichtete Wirkungen sich nahezu gleichzeitig bemerkbar machen würden, besonders dann, wenn die Abmessungen des Apparates im Vergleich zu der Wellenlänge klein wären. *Diese Wirkungen würden sich dann nahezu vollständig aufheben.* Bei Verwendung eines geradlinigen Kondensators hingegen verstärken sich alle Wirkungen[1]); bei einer natürlichen Lichtquelle erfolgen die entgegengesetzt gerichteten Schwingungen nicht gleichzeitig, sondern sie gehen nacheinander vor sich, und da diese Aufeinanderfolge unregelmäßig ist, so liegt keine Veranlassung dafür vor, daß eine solche gegenseitige Aufhebung eintritt.

Die Gesetze für die von einem geradlinigen Erreger ausgehende Strahlung sind also dieselben, welche für die Lichtstrahlung gelten; die Amplitude der Schwingungen ändert sich im umgekehrten Verhältnisse wie das Quadrat der Entfernung. Im Falle einer vollständigen Aufhebung hingegen würde sich die Amplitude im umgekehrten Verhältnisse wie das Quadrat der Entfernung und die Energie im umgekehrten Verhältnis wie die vierte Potenz der Ent-

[1]) Die Übertragung würde indessen nicht erfolgen, wenn die beiden Antennen geradlinig, beide wagerecht und einander parallel wären; unter diesen Verhältnissen würde nämlich die direkte Schwingung mit der vom Erdboden oder vom Meere reflektierten Schwingung interferieren.

fernung ändern. Bei Verwendung eines nahezu geschlossenen Erregers würde die Aufhebung nahezu vollkommen sein, und wir würden uns diesem letztgenannten Gesetze nähern.

Ich habe gesagt, daß die Vergrößerung der Antennenhöhe zu dem Zwecke erfolge, um die Wellenlänge zu vergrößern. Man darf aber nicht glauben, daß man dieselben Ergebnisse erreichen würde, wenn man die Wellenlänge durch andere Mittel vergrößerte, etwa indem man auf irgendwelche Weise die Kapazität[1]) oder die Selbstinduktion vergrößerte, da doch bekanntlich die Wellenlänge bis auf einen konstanten Faktor gleich der mittleren Proportionalen aus diesen beiden Größen ist. Nach dem Vorauf-gegangenen spielt vielmehr die Form des Erregers eine große Rolle, und wir haben eben gesehen, daß sich der Erreger nicht weit von der geradlinigen Gestalt entfernen darf, ohne daß er unfähig wird, auszustrahlen.

8. Bedeutung der Dämpfung.

Die in dem Erreger angesammelte Energie zerstreut sich durch die Strahlung; die Amplitude der Schwingungen nimmt daher schnell ab: diesen Vor-

[1]) Es sei erwähnt, daß die „dynamische Kapazität", die in die Berechnung der Wellenlänge eingeht, nicht gleich der Kapazität ist, wie sie nach statischen Methoden gemessen wird. Die Elektrizitätsverteilung während der Schwingungen unterscheidet sich nämlich sehr von der dem elektrostatischen

gang bezeichnet man als *Dämpfung*. Es ist klar, daß die Gesamtdauer der Erschütterung um so kürzer sein wird, je stärker diese Dämpfung ist; um so größer wird infolgedessen bei einer und derselben angesammelten Energie die maximale Erschütterung sein. Wie wir gesehen haben, ist nun die Wahrscheinlichkeit dafür, daß der Kohärer beeinflußt wird, um so größer, je stärker diese *maximale* Erschütterung ist; die *mittlere* Erschütterung spielt keine Rolle.

Fünfzehntes Kapitel.

Anwendungen der drahtlosen Telegraphie.

1. Vorteile und Nachteile der drahtlosen Telegraphie.

Die Telegraphie mit Hertzschen Wellen ist, wie wir gesehen haben, der optischen Telegraphie vergleichbar. Es bestehen indessen recht große Verschiedenheiten, die sich alle aus der Verschiedenheit der Wellenlängen ergeben. Da die Wellenlänge größer ist, so wird die Beugung merklich; daraus

Gleichgewicht entsprechenden. Ich lege auf diesen Punkt Nachdruck, weil bei gewissen Antennen die dynamische Kapazität zehn- bis fünfzehnmal größer sein kann als die statische.

ergibt sich die Möglichkeit, die Hindernisse zu umgehen. Das bedeutendste Hindernis ist das, welches aus der Krümmung unseres Erdballes erwächst; das gewöhnliche Licht kann ihn weder durchdringen, noch ihn umgehen; mit der optischen Telegraphie wird man daher auf große Entfernung nur dann eine Verständigung erzielen können, wenn man sehr hohe Posten hat. Bei langen Wellen ist die Beugung genügend groß, um die Möglichkeit zu gewähren, die Krümmung der Erde zu überwinden: man kann daher zwischen Punkten verkehren, die füreinander nicht sichtbar sind. Damit ist die hauptsächliche Schwierigkeit verschwunden, welche die überbrückbare Entfernung beschränkte. So gelangte man bei Wahl günstiger Posten mit optischer Telegraphie auf 40 bis 50 km; mit der drahtlosen Telegraphie kommt man auf 300 km.

Andererseits wird das sichtbare Licht durch Nebel zurückgehalten; für das Hertzsche Licht gilt das nicht. Weshalb nicht? Wenn das Licht zurückgehalten wird, so wird es nicht eigentlich absorbiert, denn es würde durch dieselbe Wassermenge in Gestalt einer homogenen Flüssigkeit ohne Schwierigkeit hindurchdringen; es wird vielmehr durch die vielfache Reflexion zerstreut, die es an der Oberfläche der unzähligen Nebeltröpfchen erfährt. Aus ganz demselben Grunde ist kompaktes Glas durchsichtig, während Glaspulver undurchsichtig ist. Da-

mit aber diese Reflexionen auftreten, müssen die Abmessungen der Tröpfchen im Verhältnis zu einer Wellenlänge groß sein. Eine alltägliche Beobachtung wird dies verständlich machen: Man sieht oft an Seifenblasen inmitten der farbigen Stellen ganz schwarze Flecken; das sind die Stellen, an denen die Dicke des Häutchens zwar keineswegs Null ist (— sie ist an keiner Stelle Null, denn die Blase ist nicht geplatzt —), wohl aber beträchtlich kleiner als eine Wellenlänge. Unter diesen Verhältnissen reflektiert die Oberfläche der Blase kein Licht mehr, und infolgedessen erscheint sie schwarz.

Die Abmessungen der Nebeltröpfchen sind nun zwar sehr groß im Verhältnis zu den Lichtwellenlängen, hingegen sehr klein im Verhältnis zu den Wellenlängen der Hertzschen Wellen. Das ist die Erklärung dafür, daß sie sich in den beiden Fällen so verschieden verhalten.

Diese leichte Durchdringungsfähigkeit des Hertzschen Lichtes durch Nebel ist eine wertvolle Eigenschaft, und man plant, sie zur Vermeidung von Zusammenstößen auf See auszunutzen.

Wie wir sahen, muß man darauf verzichten, die Hertzschen Wellen nach einer einzelnen Richtung hin zu konzentrieren, wie man es in der optischen Telegraphie tut. Dieser Nachteil aber bringt auch einen Vorteil mit sich: Wenn man die Strahlen nach einer einzigen Richtung hin konzentriert, so

muß man diese Richtung regulieren; diese Regulierung ist langwierig und schwierig, so daß man nur zwischen feststehenden Posten verkehren kann. Die Hertzschen Wellen dagegen werden unterschiedslos nach allen Richtungen hin ausgesandt und gestatten daher, mit einer beweglichen Station selbst dann zu verkehren, wenn man deren Lage nicht kennt. Daraus ergibt sich die Bedeutung des neuen Systems für die Schiffahrt.

Wir kommen nun zu den Nachteilen. Die optische Telegraphie und die Telegraphie mit Hertzschen Wellen haben gegenüber der gewöhnlichen Telegraphie einen gemeinsamen Vorteil: Der Feind kann nämlich in Kriegszeiten nicht durch Abschneiden der Drähte die Verbindung unterbrechen. Aber bei der optischen Telegraphie bleibt das Geheimnis gewahrt, es sei denn, daß der Feind sich in den Gang des dünnen Lichtbändchens stellen kann, das von einer Station zur anderen gesandt wird und meistens in großer Höhe verläuft. Die Hertzschen Wellen hingegen werden nach allen Richtungen hin ausgesandt; sie können also gerade so gut auf die feindlichen Kohärer wirken wie auf die befreundeten, und für die Wahrung des Geheimnisses kann man sich nur noch auf seine Geheimsprache verlassen. Außerdem kann der Feind die Verständigung dadurch stören, daß er unzusammenhängende Zeichen absendet, die sich dann mit den von der befreundeten

Station ausgesandten vermischen. Auch in Friedenszeiten würde die Wahrung des Geheimnisses im Verkehr von Wichtigkeit sein, und man kann einen Zeitpunkt voraussehen, wo sich die Apparate so sehr vermehrt haben werden, daß die von mehreren benachbarten Stationen ausgesandten Zeichen sich so übereinanderlagern werden, daß eine unlösbare Verwirrung entstehen würde. Es ist erinnerlich, daß Edison seinen europäischen Konkurrenten gedroht hat, ihre Versuche in dieser Weise zu stören, falls sie solche in Amerika anstellen würden.

2. Prinzip der abgestimmten Telegraphie.

Die Nachteile dieser Art haben die Erfinder zu mildern gesucht. Zu diesem Zwecke sind viele Verfahren in Vorschlag gebracht worden; ich will aber nur von denen sprechen, die man bereits in praktischen Versuchen zu erproben begonnen hat, und die sämtlich auf dem Prinzip der „Abstimmung" beruhen, das heißt, die akustische Erscheinung der Resonanz nachzuahmen suchen. Bekanntlich gerät ein Körper, der zu tönen vermag und den man in die Nähe eines anderen schwingenden Körpers bringt, seinerseits in Schwingungen, aber diese Schwingungen, die sehr stark sind, wenn die Eigenschwingungen der beiden Körper miteinander im Einklang stehen, werden fast unmerklich, wenn man nur im geringsten von diesem Einklang abweicht.

Wenn man dieselben Ergebnisse mit elektrischen Schwingungen erreichen könnte, so wäre die Aufgabe gelöst. Die Zeichen von verschiedener Periode könnten sich ohne Schaden übereinanderlagern, jeder Empfänger würde sich die Periode heraussuchen, auf die er abgestimmt wäre. Wir würden übrigens auch nicht mehr zu fürchten brauchen, daß der Feind unsere Telegramme auffängt, denn er kennt ja die Periode unseres Erregers nicht.

Leider trifft man dabei auf große Schwierigkeiten. Zweifellos schwingt ein Empfänger besser, wenn er mit dem Erreger im Einklang steht; wenn man aber von diesem Einklang abweicht, so nimmt die Amplitude der Schwingungen, statt wie in der Akustik fast plötzlich unmerklich zu werden, ziemlich langsam ab. Es besteht also Resonanz, aber unvollkommene.

Wir kennen diese Resonanz auch schon aus den alten Versuchen von Hertz, bei denen kein Kohärer zur Anwendung gelangte. Vielleicht würden wir sie auch heute noch nicht kennen, wenn man immer die Röhre mit Feilicht benutzt hätte. Der Kohärer vermag nämlich, gerade wegen seiner Empfindlichkeit, diese Unterschiede nicht wahrzunehmen. Er wird durch sehr schwache Erregungen beeinflußt, und da er nur eine Auslösevorrichtung darstellt, so spricht er auf starke Erregungen nicht besser an als auf schwache, vorausgesetzt, daß die letzteren

seine Empfindlichkeitsschwelle überschreiten. Aus diesem Grunde kann die Periode im Verhältnis von 1 bis 20 schwanken, also wie bei Tönen, die fünf Oktaven auseinanderliegen, ohne daß man in der Güte der Übermittlung einen merklichen Unterschied beobachtet.

Woher kommt diese Verschiedenheit zwischen der akustischen und der elektrischen Resonanz? Sie kommt daher, daß die Schwingungen, wie wir gesehen haben, sehr schnell *gedämpft* werden. Die Folge davon ist, daß die elektrischen Schwingungen eher einem Geräusch vergleichbar sind als einem reinen musikalischen Ton.

3. Marconis Sender.

Man hat zahlreiche Versuche gemacht, dieser Schwierigkeit Herr zu werden. So weit es sich beurteilen läßt (die Erfinder haben nämlich naturgemäß ihr Geheimnis zu wahren gesucht), ähneln sich alle Apparate in ihren wesentlichen Zügen. Ich will deshalb nur im Vorübergehen auf die geistreiche Idee von Slaby hinweisen, der den Kohärer nicht in der Nähe eines Knotens anordnet, woselbst die Amplitude der Änderungen ein Minimum hat, sondern in der Nähe eines Bauches. Im übrigen glaube ich, daß es genügen wird, in kurzen Zügen einen dieser Apparate zu beschreiben, und ich wähle dazu den, über den wir die meisten Einzelheiten wissen. Ich

werde mich also nur über die Vorrichtungen verbreiten, deren sich Marconi für die Verständigung von Wimereux nach Dover über den Kanal und von Antibes nach Korsika über das Mittelmeer bedient hat.

Der neue Marconi-Sender (siehe Fig. 8) besteht aus einem primären Erreger und einem sekundären Apparat. Der primäre Erreger wird aus dreizehn Leidener Flaschen gebildet, die parallel geschaltet sind, und deren Belegungen durch einen Draht verbunden sind; dieser Draht ist auf eine Länge von einigen Millimetern unterbrochen, und an dieser Unterbrechungsstelle geht der Funken über. Die Belegungen stehen andererseits mit den beiden Polen eines Rühmkorff-Induktors in Verbindung. Dieser Induktor lädt in der bereits erörterten Weise die Flaschen, und wenn der Funke überschägt, so entladen sich die Flaschen oszillatorisch. *Es ist zu beachten, daß dieser Erreger nicht geradlinig sondern nahezu in sich selbst geschlossen ist.*

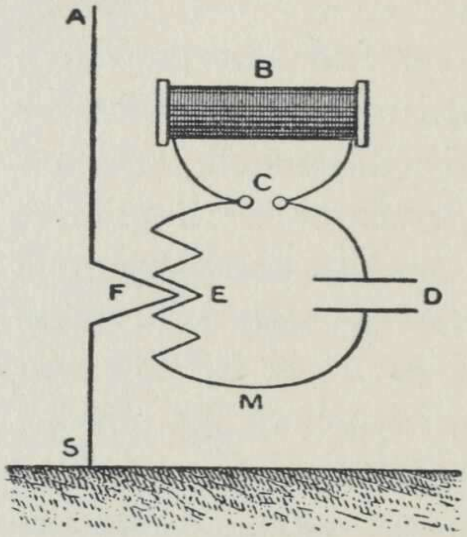

Fig. 8.
Schematische Darstellung des Marconi-Senders.
B, Induktor. — *CDME*, primärer Erreger. — *C*, Funkenstrecke. — *D*, Leidener Flaschen. — *AFS*, sekundärer Teil. — *A*, Antenne. — *F*, Sekundärwicklung des Umformers. — *S*, Erde.

Der sekundäre Teil des Apparates wird von der

Antenne gebildet, die unmittelbar geerdet ist. Es besteht hier also keine unmittelbare Verbindung zwischen der Antenne und dem Erreger mehr: die Erschütterung wird nur durch Induktion auf die Antenne übertragen, und zwar folgendermaßen: Die Einrichtung eines Umformers (Transformators) ist bekannt: Es ist einfach eine Spule, auf die zwei Drähte aufgewickelt sind; wenn man in dem einen dieser Drähte einen veränderlichen Strom erzeugt, so entsteht in dem andern Draht ein induzierter Strom. Durch einen ganz ähnlichen Apparat wird im vorliegenden Falle die Erschütterung übertragen: auf einen in Öl gelagerten Holzrahmen ist einerseits der primäre Draht des Erreges in einigen Windungen, andererseits der sekundäre Draht, der die Antenne mit der Erde verbindet, in einer Windung gewickelt

Es ist vorauszusehen, daß durch diese Anordnung die Dämpfung verringert wird, so daß sich die elektrische Schwingung ein wenig einem reinen musikalischen Ton nähert. Ich habe oben gesagt, daß ein nahezu geschlossener Erreger sehr schlecht ausstrahlt; gerade aus diesem Grunde bewahrt er seine Energie und klingt sehr langsam ab. Er würde seine Energie noch sehr viel länger bewahren, wenn er nicht durch den Umformer einen Teil davon an die Sekundäre und an die Antenne abgeben würde. Diese strahlt ihrerseits die Energie, die sie empfängt, sehr schnell aus, und dabei bleibt doch die Amplitude

ihrer Schwingungen einige Zeit hindurch erhalten, weil sie nämlich in dem Maße, wie sie Energie verliert, wieder neue Energie aus dem Transformator empfängt, so lange, bis der in der Primären angesammelte Energievorrat erschöpft ist.

Die Dämpfung muß also schwächer sein als bei den gewöhnlichen Apparaten, und sie würde noch schwächer sein, wenn nicht die ausstrahlende Antenne mit der Sekundärwickelung verbunden wäre. Das wird durch die Versuche von Tissot vollauf bestätigt. Dieser gelehrte Offizier beobachtete mit Hilfe eines rotierenden Spiegels den Funken bei der gewöhnlichen Anordnung; dabei erhielt er höchstens drei Bilder des Funkens. Das bedeutet, daß bereits nach Verlauf von drei Schwingungen die Schwingungen unmerklich geworden waren. Mit einer der Marconischen analogen Anordnung erhielt er zehn Bilder, und noch viel mehr erhielt er, wenn die Antenne nicht mit der Sekundärwickelung verbunden war.

Ich habe gesagt, eine starke Dämpfung sei für die Übertragung auf weite Entfernungen hin günstig. Hier wird nun die Dämpfung vermindert, ohne daß dadurch die Reichweite herabgesetzt würde. Die gesamte aufgespeicherte Energie ist nämlich infolge der großen Kapazität der Leidener Flaschen größer. Man kann aus dieser Kapazität und aus der durch die Länge des Funkens gemessenen Potentialdifferenz

den aufgespeicherten Energievorrat berechnen. Andererseits beläuft sich nach den eben erwähnten Untersuchungen die Dauer von zehn Schwingungen auf $^1/_{100000}$ Sekunde; während dieses Zeitraumes wird nun dieser Energievorrat verausgabt; wir finden somit, daß während dieser sehr kurzen Zeit die mittlere Leistung etwa dreißig Pferdestärken betragen wird. Wie man sieht, kann die *maximale Erschütterung* recht beträchtlich sein. Diese maximale Erschütterung würde übrigens, wenn man tatsächlich Resonanz erzielte, *bei abgestimmten Empfängern* noch vervielfacht werden, weil dann die Wirkungen der aufeinanderfolgenden Schwingungen übereinstimmen und sich einander zugesellen würden. Als Endergebnis finden wir, daß die Reichweite bei abgestimmten Empfängern vergrößert und bei anderen verringert werden würde.

4. Marconis Empfänger.

Im Empfänger (siehe Fig. 9) ist die Antenne, gerade wie im Geber, unmittelbar zur Erde abgeleitet. Die Erschütterung, die von dieser Antenne aufgefangen wird, wird durch Induktion auf den Kohärerkreis übertragen, und zwar durch Vermittlung eines besonderen Umformers, der den Namen *Jigger* (Springer) führt. Dieser Umformer unterscheidet sich stark von dem des Senders; es handelt sich nämlich hier nicht mehr darum, die Energie

aus der Primären (die in diesem Falle die Antenne ist) auf die Sekundäre (die hier aus dem Kohärerkreise besteht) *allmählich* zu übertragen und dadurch eine schwache Dämpfung zu erhalten, sondern im Gegenteil darum, sie *sehr schnell* zu übertragen, damit die maximale Erschütterung, welche der Kohärer erhält, möglichst groß sei.

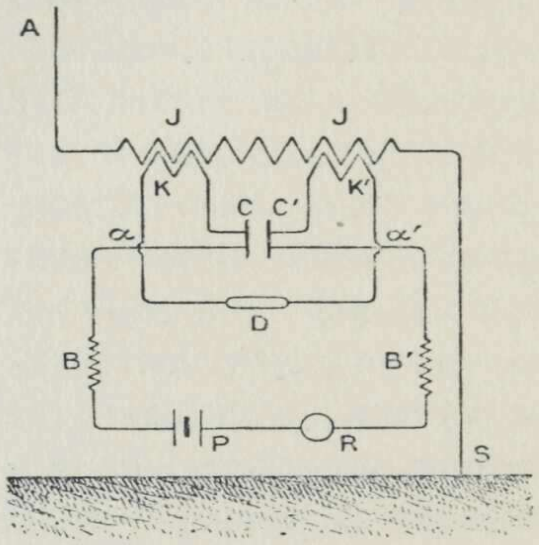

Fig. 9.
Schematische Darstellung des Marconi-Empfängers.

AJS, Primärkreis. — *A*, Antenne. — *J*, Primärwicklung des Jiggers. — *S*, Erde. *CKDK'C'*, Schwingungskreis der Sekundärschwingungen. — *CC'*, Belegungen des Kondensators. — *KK'*, Sekundärwicklungen des Jiggers. — *D*, Kohärer. — *PRB'C'KCBP*, Stromkreis der Stationsbatterie. — *P*, Stationsbatterie. — *R*, Relais für den Morseapparat. — *BB'*, Selbstinduktionsspulen.

(An den Kreuzungsstellen α, α' der beiden Stromkreise kreuzen sich die Drähte, ohne daß eine Verbindung zwischen ihnen vorliegt.)

Die Sekundäre des Jiggers besteht aus zwei getrennten Spulen, diese sind erstens mit den beiden Belegungen eines Kondensators, zweitens mit den beiden Elektroden des Kohärers und drittens mit den beiden Polen einer Stationsbatterie verbunden, mit letzteren unter Zwischenschaltung von Selbstinduktionsspulen. Der Stromkreis, in dem die oszillierenden Ströme fließen, enthält den Kondensator, die Spulen des Jiggers und den Kohärer; dieses

System ist also einem nahezu geschlossenen Erreger analog. Der von dem Strome der Stationsbatterie durchflossene Stromkreis enthält diese Batterie, die Selbstinduktionsspulen, die Spulen des Jiggers und den Kohärer. Der Gleichstrom der Batterie kann seinen Weg nicht durch den ersten Stromkreis nehmen, weil er nicht durch den Kondensator übergehen kann; er wird also nur dann fließen, wenn der Kohärer durch die Hertzschen Wellen leitend gemacht worden ist.

Andererseits setzen bekanntlich die Selbstinduktionsspulen dem Gleichstrom keinerlei Widerstand entgegen, während sie den hochfrequenten Wechselstrom aufhalten; ebenso kann eine große Masse infolge ihrer Trägheit unter dem Einfluß einer konstanten Kraft eine große gleichförmige Geschwindigkeit annehmen, sie kann dagegen nicht leicht eine hin und hergehende Bewegung annehmen. Die Selbstinduktionsspulen werden daher den Batteriestrom nicht stören, während sie die Hertzschen Schwingungen aufhalten und sie verhindern werden, sich in den Stromkreis der Stationsbatterie zu verlieren.

Es scheint, daß man mit diesen Vorkehrungen durch eine passende Einstellung eine Art Resonanz erreichen kann. Ist der Grund hierfür in der schwächeren Dämpfung zu suchen? Es mag sein, aber wir wissen noch nicht genug hierüber, um es behaupten zu können.

Wir dürfen uns aber keinen Täuschungen über die Vollkommenheit dieser Resonanz hingeben. Ein und derselbe Empfänger wird unterschiedslos auf Wellen von ziemlich verschiedener Länge ansprechen; er ist einem Ohre zu vergleichen, das zwar die Oktave unterscheiden könnte, aber kleinere Intervalle nicht zu erkennen vermöchte.

Die Geheimhaltung der Mitteilungen ist also nicht gewährleistet; denken wir uns, die Übermittelung solle auf 50 km Entfernung erfolgen, so werden die in diesem Abstande aufgestellten Empfänger nur dann arbeiten, wenn sie *ungefähr* mit dem Sender im Einklang stehen; aber in einem Umkreise von 5 km beispielsweise werden sämtliche Kohärer gleichmäßig ansprechen, mögen sie nun abgestimmt sein oder nicht. Und selbst in großer Entfernung wird man nicht lange suchen brauchen, um eine hinreichende Abstimmung zu erhalten.

Dagegen wird das neue Verfahren vielleicht ausreichen, um die Verwirrung zwischen den von einer Anzahl benachbarter Antennen ausgesandten Zeichen zu vermeiden.

Es möge bei dieser Gelegenheit noch darauf hingewiesen werden, daß es in jüngster Zeit Tissot gelungen ist, Zeichen mittels drahtloser Telegraphie zu übermitteln, und zwar *ohne Verwendung des Kohärers*, nämlich *unter Benutzung des* oben (Seite 61) beschriebenen *Bolometers*. Dieser Apparat ist für

die mittlere Erschütterung empfindlich und nicht, wie der Kohärer, für die maximale; er gestattet daher, eine viel vollkommenere Resonanz zu erreichen.

5. Drahtlose Telegraphie über den Ozean.

Vor einiger Zeit verkündete Marconi, daß es ihm gelungen sei, von der Spitze von Cornwallis in England bis nach Neufundland zu verkehren. Obwohl man durch den Erfolg der Versuche zwischen Korsika und Antibes bereits vorbereitet war, wurde diese Nachricht doch nicht ohne einiges Mißtrauen aufgenommen. Bald danach erfuhr man, daß dieselbe Station zu Poldhu in Cornwallis mit einem italienischen Schiffe, dem Carlo Alberto, auf der Reede von Spezia verkehrt habe. Die Entfernung war ungefähr ein Drittel so groß, aber die Schwierigkeit ungefähr dieselbe, weil die Verbindung über See immer leichter ist als über Land, und in diesem Falle das Hindernis zu überwinden war, welches das Zentralmassiv von Frankreich bot.

Diesmal konnte man nicht so leicht zweifeln, denn diesmal waren die Zeugen nicht nur Interessenten, sondern man hätte sich auch der Beihilfe der Offiziere des italienischen Kriegsschiffes versichert haben müssen. Außerdem hatten Zwischenstationen unterwegs die nicht für sie bestimmte Depesche empfangen, gleichzeitig ein Beweis dafür, daß diese Depesche nicht einfach eine Mystifikation

war, und daß die vollkommensten Abstimmungsvorkehrungen zur Wahrung des Korrespondenzgeheimnisses nicht ausreichen. Zugleich verrieten diese indiskreten Zwischenstationen ein Geheimnis, dessen Erwähnung in den offiziellen Berichten vergessen worden war, daß nämlich das Telegramm 55 Stunden lang unausgesetzt wiederholt werden mußte, und daß erst nach Verlauf dieser Zeit die Bestimmungsstation das Signal empfing.

Man hat noch keine regelmäßige Verbindung zwischen den beiden Kontinenten herzustellen vermocht, aber man gelangt bereits etwa halbwegs, so daß die Schiffe fast während der ganzen Überfahrt mit der zivilisierten Welt in Verbindung bleiben.

Die Schwierigkeit ist eine doppelte: zunächst würde sich die übermittelte Energie schon im umgekehrten Verhältnis wie das Quadrat aus der Entfernung selbst dann ändern, wenn kein Hindernis vorläge. Ferner nimmt das Hindernis, das die Krümmung der Erde bietet, mit der Entfernung zu, so daß der Teil der Energie, der gebeugt wird, um so geringer sein wird, je größer die Entfernung ist. Trotzdem scheint diese doppelte Schwierigkeit überwunden worden zu sein. Verdanken wir das nur der ungeheuren Leistungsfähigkeit der Apparate, der Verwendung großer Wellenlängen, der Empfindlichkeit des Kohärers? Die Annahme ist nicht unmöglich mit Rücksicht auf das oben (Seite 73) Gesagte.

Oder versagt die Theorie und reicht nicht mehr aus, um die Tatsachen zu erklären? Oder wird schließlich das Hertzsche Licht an den höheren Schichten der Atmosphäre reflektiert, die dünn genug sein würden, um zu leiten, wie ich gleichfalls oben (Seite 74) erörtert habe?

Wodurch sind diese Erfolge erreicht worden? Anscheinend hauptsächlich durch gewaltige Erhöhung der Leistung und aller Abmessungen.

1. Der gewöhnliche Kohärer ist durch den oben (Seite 74—76) erwähnten magnetischen Detektor ersetzt worden.

2. An die Stelle der einzelnen Antenne ist ein divergentes Bündel von 400 Seilen von etwa 100 m Länge getreten. Diese Seile sind schräg ausgespannt, so daß ihre oberen Enden 70 m über dem Erdboden liegen.

3. Der erregende Apparat besteht aus einer Wechselstromquelle von 2000 Volt und 50 Kilowatt; der Strom wird in die Primärwicklung eines Umformers gesandt; die Wechselstromquelle spielt die Rolle der gewöhnlichen Betriebsbatterie, und die Primärwicklung des Umformers spielt die Rolle der Primärspule des Induktoriums. Die Sekundärwicklung dieses Umformers, welche die Spannung auf 20000 Volt bringt und die Rolle der Sekundärspule des Induktoriums vertritt, steht mit einem primären Erreger in Verbindung, der dem Erreger *CDME* in der Fig. 8 analog ist.

Dieser Erreger wirkt aber nicht unmittelbar durch Induktion auf den Antennenkreis, wie bei dem in Fig. 8 dargestellten Sender. Er wirkt vielmehr auf einen zweiten Erreger, der dann seinerseits auf den Antennenkreis wirkt.

Die Spannung beträgt 20000 Volt und die Kapazität des Kondensators 1 Mikrofarad. Wenn der entsprechende Energievorrat in $\frac{1}{100000}$ Sekunde verausgabt wird, so entspricht das einer Leistung von 40000 Kilowatt oder nahezu 50000 Pferdestärken. Diese Leistung ist also nahezu 2000 mal stärker als die bei den Versuchen zwischen Korsika und Antibes zur Anwendung gelangte; es wird dadurch erklärlich, daß sie eine zwanzigfach größere Reichweite zu erlangen gestattet.

6. Gerichtete Telegraphie.

In jüngster Zeit hat man verschiedene Versuche gemacht, den größten Teil der erzeugten Energie nach einer bestimmten Richtung zu konzentrieren. Man würde dadurch offenbar große Vorteile gewinnen, weil gewöhnlich der größte Teil der Energie verloren wird. Um dieses Ziel zu erreichen, hat man Antennen von besonderer Form benutzt, oder auch die Interferenzen zwischen den von zwei oder mehreren Antennen ausgesandten Wellen zu verwerten versucht. Es ist allerdings möglich, daß diese Wellen in einer gewissen Richtung im Einklang

stehen und sich gegenseitig verstärken, während sie in anderen Richtungen, infolge ihres Gangunterschiedes, einander entgegengesetzt sind und sich vernichten. Die bisher erlangten Ergebnisse sind noch unvollkommen und tragen den Charakter von Vorversuchen.

In letzter Zeit hat man versucht, den singenden Lichtbogen nach dem Poulsenschen System, von dem im dreizehnten Kapitel die Rede gewesen ist, für die drahtlose Telegraphie zu verwenden. Da bei ihm die Dämpfung in Wegfall kommt, so darf man hoffen, daß dadurch die Abstimmung leichter werden wird.

Verlag von Johann Ambrosius Barth in Leipzig

Die Radio-Telegraphie

Gemeinverständlich dargestellt

von

Ingenieur O. NAIRZ

VIII, 271 Seiten. — Mit 154 Abbildungen. — Geb. M. 5.—.

Das von Assistenten Professor Slabys verfaßte Buch ist aus praktischen Arbeiten hervorgegangen und in leichtverständlicher Vortragsweise geschrieben. Es bildet Band IV der neuen, von Prof. Dr. Weinstein herausgegebenen Sammlung „Wissen und Können". Das Buch enthält weitausholend die physikalischen Grundlagen der modernen Radio-Telegraphie sowie deren Zwecke und Erfolge, wobei 154 Abbildungen zwecks Erleichterung des Verständnisses eingefügt sind. Mit Beschränkung auf das absolut Wertvolle ist Nebensächliches, wie Veraltetes, das erfahrungsgemäß den Leser nur verwirrt, ausgelassen. Dem Wichtigen konnte deshalb mehr Raum gewidmet werden, welcher der drahtlosen Telephonie und den ungedämpften Schwingungen besonders zustatten kommt.

„Zeitschrift für Eisenbahn-Telegraphen-Beamte": Allen denjenigen, welche sich über Wesen, Betriebseigentümlichkeiten und Aussichten der Radio-Telegraphie ohne langes Studium in gemeinverständlicher Weise orientieren wollen, können wir dieses Werk empfehlen. Es trägt keine wissenschaftliche Theorie, die nur unter Anwendung eines großen Apparates von Spezialkenntnissen zu geben wäre, sondern begnügt sich mit Erklärungen, die durch Experimente gestützt sind und leicht plausibel erscheinen.

„Schweizerische Elektrotechnische Zeitschrift": Ohne eine streng wissenschaftliche Theorie vorzutragen, versteht es der Verfasser, durch von Experimenten unterstützte Erklärungen das auf radio-telegraphischem Gebiete Erforschte in gemeinverständlicher Weise vorzuführen.